

BC-C  
523

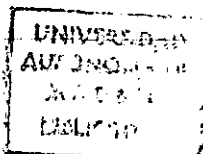
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID  
FACULTAD DE CIENCIAS

LIMNOLOGIA DE LAS FORMACIONES PALUSTRES SITUADAS  
SOBRE EL ACUIFERO DE MADRID. ANALISIS DE LAS  
RELACIONES ENTRE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRANEAS

TESIS presentada por ANA GONZALEZ BESTEIRO para optar  
al grado de Doctora en Ciencias Biológicas.

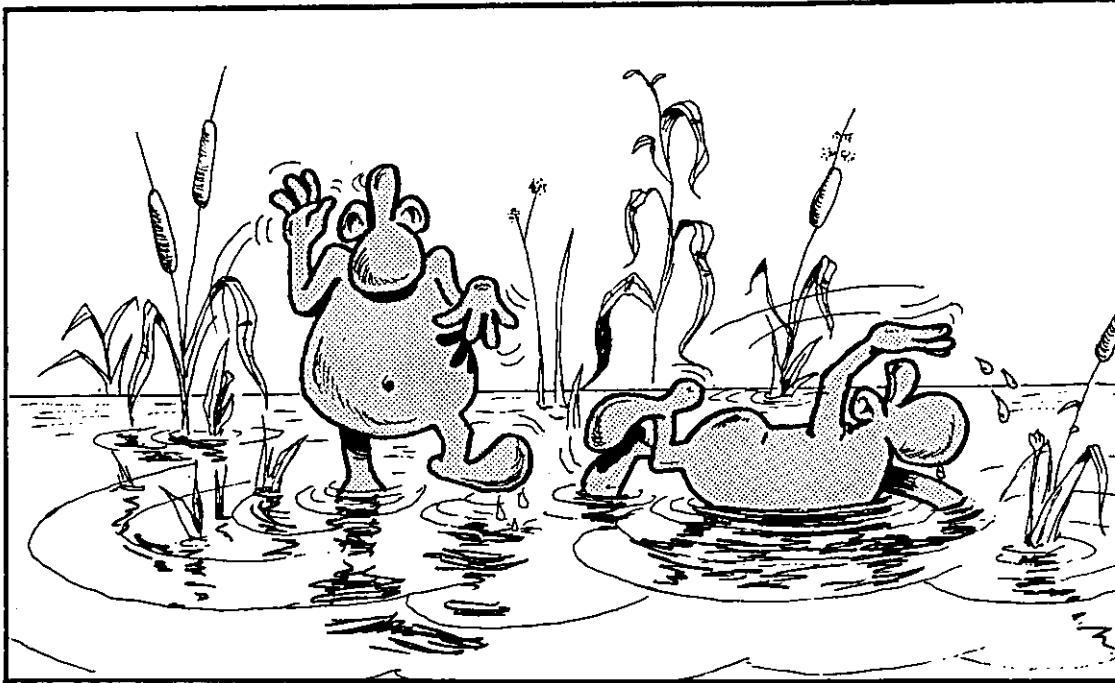
Trabajo dirigido por el Dr. CARLOS MONTES DEL OLMO,  
Profesor Titular de Ecología de la Universidad  
Autónoma de Madrid.

Madrid, Enero de 1992.



Ref. BC154556

A Juan y a todos  
aquellos años.



"Wetlands include a diversity of unique places where you can get your feet wet but can't swim..."

Zimmerman, 1987

## ***AGRADECIMIENTOS***

Cuando se termina un trabajo de estas características, sobra decir que son muchas las personas que han contribuido de una forma u otra a que salga adelante. En realidad, se agradecen tanto los ánimos y muestras de apoyo como los consejos profesionales.

El Dr. Carlos Montes es una de ellas. Gracias a su dirección y asesoramiento se realizó este trabajo, pero gracias a su amistad y confianza, mis pasos son ahora más seguros y tranquilos.

La Dra. Isabel Herraiz no sólo fue mi "asesora hidrogeológica" en las miles de dudas que fueron surgiendo, sino que también me animó en los momentos de desaliento.

El Dr. Pedro Herrera, me ayudó a dar los primeros pasos en este complicado mundo de las aguas subterráneas y los humedales, siempre dispuesto a acompañarme al campo y sugerirme buenas ideas.

Los Dres. Miguel Alonso, Rosario Vidal-Abarca, M. Luisa Suárez, Andrés Millán y Santos Cirujano ayudaron a determinar algunas de las especies de organismos que aparecen en este trabajo.

Máximo Florín y Salvador Mollá estuvieron siempre dispuestos salvarme de las trampas que los ordenadores me fueron tendiendo.

Fernando Moya fue mi compañero inseparable durante todos los años que duró el muestreo y los análisis químicos, aguantando, todo hay que decirlo, más de un gruñido.

Marisa Pascual corrigió pacientemente todo el texto y ayudó a poner las comas y los puntos en su sitio, además de convertirse en una gran amiga.

Juan Manuel Ortiz me dedicó muchos fines de semana, haciendo ilustraciones y dando los últimos toques.

Eugenio, Leonardo, Santos y en general la gente de "Limno" de la Autónoma siempre estuvieron dispuestos a echarme una mano, manteniendo además un clima de trabajo tan divertido y activo que casi siempre fue estupendo ir a currar.

Helena, Paco, Juan y Miguel Angel me hicieron un hueco en sus casas cada vez que necesité cambiar de aires para seguir escribiendo.

Mi familia, Paco, Merche y Rocio vivieron pacientemente el lado doméstico de mis agobios.

El Canal de Isabel II financió parte de esta investigación.

A todos ellos, y a todos los amigos y amigas que me han mimado durante este tiempo, les doy las gracias más sinceras.

## **INDICE**

Página

### **1. INTRODUCCION**

1.1. JUSTIFICACION .....	13
1.2. OBJETIVOS .....	14
1.3. PLAN DE TRABAJO.....	15

### **2. PAPEL DE LA HIDROLOGIA EN ESTUDIOS SOBRE ECOSISTEMAS ACUATICOS CONTINENTALES.**

2.1. DELIMITACION DEL CONCEPTO DE HUMEDAL.....	19
2.2. ESTUDIOS DE INTERACCION ENTRE AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA.....	25
2.3. SITUACIONES HIDROLOGICAS FAVORABLES PARA LA APARICION DE HUMEDALES.....	31
2.4. UTILIZACION DE CRITERIOS HIDROLOGICOS EN LA CLASIFICACION DE HUMEDALES.....	35
2.5. IMPORTANCIA DE LA PERSPECTIVA HIDROLOGICA EN LA GESTION DE HUMEDALES.....	38

### **3. LA FACIES ARCOSICA DEL ACUIFERO DE MADRID. DELIMITACION DE UNIDADES ECOLOGICAS HOMOGENEAS EN RELACION A FACTORES SUPERFICIALES Y SUBTERRANEOS DEL MEDIO FISICO**

3.1. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO	
3.1.1. Características geográficas.....	41

3.1.2. Características geológicas.....	46
3.1.3. Características hidrogeológicas.....	52
3.2. SECTORIZACION AMBIENTAL. COMPONENTES	
SUPERFICIALES Y SUBTERRANEOS DEL MEDIO	
FISICO	
3.2.1. Introducción.....	58
3.2.2. Metodología. Cuantificación	
de variables.....	62
3.2.3. Delimitación de unidades	
ambientales.....	74
3.2.4. Discusión.....	84
4. INVENTARIO DE FORMACIONES PALUSTRES	
SITUADAS SOBRE EL ACUIFERO DE MADRID	
4.1. INTRODUCCION.....	90
4.2. METODOLOGIA.....	91
4.3. RESULTADOS.....	95
4.4. DISCUSION.....	96
5. CLASIFICACION GENETICO-FUNCIONAL DE FORMACIONES	
PALUSTRES.	
5.1. INTRODUCCION.....	105
5.2. METODOLOGIA	
5.2.1. Medidas morfológicas y	
fisiográficas.....	107
5.2.2. Muestreo y análisis de	
variables físico-químicas.....	111
5.2.3. Muestreo de fauna y vegetación	
acuáticas.....	118

5.3. MORFOMETRIA PALUSTRE Y REGIMEN HIDRICO EN RELACION CON LOS FLUJOS DE AGUA SUBTERRANEA.	
5.3.1. Tamaño, forma y permanencia del agua.....	119
5.3.2. Tipos de formaciones palustres en función de sus características morfo-fisiográficas.....	126
5.4. CARACTERIZACION HIDROQUIMICA SUPERFICIAL EN RELACION CON EL GRADO DE MINERALIZACION DEL AGUA SUBTERRANEA.	
5.4.1. Relaciones entre medidas de conductividad y salinidad.....	130
5.4.2. Concentración y composición iónica.....	135
5.4.3. Parámetros limnológicos indicadores del estado trófico.....	139
5.4.4. Origen de los iones mayoritarios disueltos en las aguas superficiales.....	142
5.4.5. Tipos de formaciones palustres en función de sus características fisico-químicas.....	148
5.5. CARACTERIZACION BIOTICA EN RELACION CON LA ALIMENTACION HIDRICA PRINCIPAL.	
5.5.1. Composición y estructura de de bentos, meiobentos y macrófitos acuáticos.....	167
5.5.2. Tipos de formaciones palustres función de su biota acuática.....	174
5.6. PROPUESTA DE UNA CLASIFICACION GENETICO- FUNCIONAL DE FORMACIONES PALUSTRES.....	178
5.7. DISCUSION.....	184



**6. MODELOS DE FUNCIONAMIENTO EN FORMACIONES  
PALUSTRES CON DISTINTO GRADO DE RELACION  
CON EL AGUA SUBTERRANEA**

**6.1. INTRODUCCION.....190**

**6.2. METODOLOGIA**

**6.2.1. Elección de las estaciones  
de muestreo y periodicidad  
en la toma de datos.....191**

**6.2.2. Medidas de los componentes  
básicos del balance hídrico  
en cada laguna.....195**

**6.2.3. Análisis de parámetros químicos  
y cálculo de índices de saturación  
para algunos minerales.....209**

**6.3. EVAPORACION Y EVAPOTRANSPIRACION:  
COMPARACION DE VARIOS METODOS DE  
MEDIDA.....211**

**6.4. LAGUNA EPIGENICA DE RECARGA:**

**LAGUNA CHICA**

**6.4.1. Variaciones en los niveles  
de agua superficial y subterránea.  
Balances hídricos.....212**

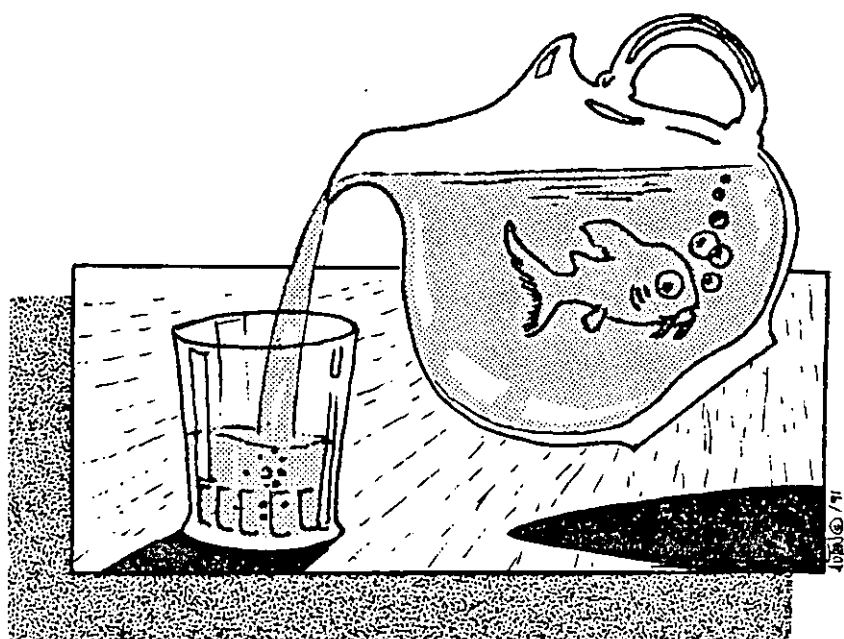
**6.4.2. Evolución geoquímica de agua  
superficial y subterránea.....221**

**6.5. LAGUNA EPIGENICA DE CUBETA IMPERMEABLE:**

**LAGUNA DELGADA**

**6.5.1. Variaciones en los niveles  
de agua superficial y subterránea.  
Balances hídricos.....227**

6.5.2. Evolución geoquímica de agua superficial y subterránea.....	233
6.6. LAGUNA HIPOGENICA DE FLUJOS REGIONALES ALCALINOS: OJO DEL BRAVO	
6.6.1. Variaciones en los niveles de agua superficial y subterránea. Balances hídricos.....	240
6.6.2. Evolución geoquímica de agua superficial y subterránea.....	244
6.7. LAGUNA HIPOGENICA DE FLUJOS REGIONALES MIXTOS: LAGUNA DE LAS TORRES	
6.7.1. Variaciones en los niveles de agua superficial y subterránea. Balances hídricos.....	253
6.7.2. Evolución geoquímica de agua superficial y subterránea.....	262
6.8. FUNCIONAMIENTO GLOBAL DE FORMACIONES PALUSTRES EPIGENICAS E HIPOGENICAS: MODELOS CONCEPTUALES.....	267
6.9. DISCUSION.....	274
7. DISCUSION GENERAL.....	281
8. CONCLUSIONES.....	290
9. BIBLIOGRAFIA.....	288
10. APENDICES.....	335



## 1. INTRODUCCION

### ***1.1. JUSTIFICACION***

A pesar de la reconocida importancia que posee el conocimiento de las condiciones hidrológicas para entender, cuantificar y evaluar las funciones y procesos que se desarrollan en los humedales, existe una gran escasez de trabajos de investigación realizados desde esta perspectiva (Gosselink & Turner, 1978; Mitsh & Gosselink, 1986).

En muchos casos, como señala Hollands (1987), los estudios que relacionan las aguas superficiales con las subterráneas, se han iniciado por la necesidad de resolver los problemas generados por las extracciones abusivas de agua del subsuelo que han hecho descender los niveles piezométricos y afectado, en último término, a los estados naturales de inundación de los humedales.

En otras ocasiones, la necesidad de realizar clasificaciones e inventarios basados en criterios hidrológicos, ha puesto de manifiesto la falta de información que sobre estos aspectos se posee (Carter, 1986), sobre todo en lo referente a la componente subterránea que ha sido tradicionalmente la parte minoritaria en los estudios hidrológicos (Winter, 1976).

Es evidente que en nuestros días estas investigaciones constituyen temas de alta prioridad dentro de la comunidad científica internacional, ya que la capacidad para gestionar estos ecosistemas se ve en muchas ocasiones limitada por el desconocimiento de sus aspectos hidrológicos (Novitzki, 1989).

Una de las mayores dificultades a la hora de emprender este tipo de estudios, encaminados a descubrir las interacciones entre las aguas superficiales y subterráneas, procede de la necesidad de poseer análisis teóricos previos que definan los principios de esta interacción y sin los cuales, los trabajos de campo no alcanzarán su óptimo (Winter, 1977).

Precisamente estos estudios de campo son necesarios para verificar los modelos teóricos, así como para desarrollar técnicas de medida prácticas.

Sin embargo, todo ello supone la puesta en juego de equipos de trabajo interdisciplinares que aborden los diferentes aspectos del problema (Carter & Novitzki, 1988), condición que no siempre es fácil de conseguir.

En nuestro caso, los modelos de funcionamiento hidráulico realizados por Llamas & López Vera (1975) para el acuífero de Madrid, han sentado sólidas bases para realizar el trabajo que a continuación se presenta.

## ***1.2. OBJETIVOS***

En un sentido amplio, el presente estudio, trata de conocer el grado de implicación que poseen las aguas subterráneas en la organización de los ecosistemas palustres, así como de determinar hasta qué punto los

factores referentes a la hidrología superficial, subterránea o la interacción de ambas, puede imprimir variabilidad espacial y/o temporal a los humedales de un área.

Desde esta perspectiva, los objetivos prioritarios del trabajos se pueden concretar en:

- Poner de manifiesto los factores del medio físico que permiten la división de un área geográfica en sectores de igual significado ecológico.
- Realizar un inventario de formaciones palustres en la región del acuífero de Madrid.
- Identificar los atributos del régimen hidrológico, superficial y subterráneo que influyen o modifican el rango de parámetros abióticos y de respuestas bióticas en las lagunas estudiadas.
- Definir criterios genético-funcionales que sienten las bases de una clasificación de humedales generalizable a otras áreas.
- Elaborar un modelo conceptual de funcionamiento hidrológico e hidroquímico de formaciones palustres a partir del estudio conjunto de su dinámica temporal y la del agua subterránea.

### ***1.3. PLAN DE TRABAJO***

Despues de la presentación de los objetivos de la

tesis, se pasa en el capítulo 2 a revisar el papel jugado por la hidrología en los estudios limnológicos referentes a humedales, así como el estado actual de los conocimientos sobre las relaciones entre aguas superficiales y subterráneas.

En este mismo capítulo se delimita el concepto de humedal desde una perspectiva ecológica que será empleado a lo largo de todo el trabajo.

En el capítulo 3 se aborda la sectorización ambiental del acuífero de Madrid a partir de los datos del medio físico recopilados de la bibliografía y referentes a aspectos fisiográficos e hidrológicos superficiales y subterráneos. Con ello se pretende delimitar regiones homogéneas en cuanto a la posibilidad de mantener formaciones palustres con origen y funcionamiento similares.

Mediante el inventario de lagunas realizado en el capítulo 4 se persigue conocer el patrimonio palustres del área de estudio así como poner en evidencia su estado de conservación.

En el capítulo 5 se realiza la integración de la información física y biológica recogida en los humedales conservados, con los modelos hidrodinámicos e hidroquímicos descritos para el acuífero de Madrid, con el fin de detectar los mecanismos responsables de la formación de tales sistemas así como del modo de producirse su abastecimiento hídrico. De esta forma se intenta dar validez a la sectorización ambiental desarrollada en el capítulo 3 a la vez que se perfilan criterios para clasificar humedales atendiendo al compromiso de una doble perspectiva hidrológica y

ecológica.

El estudio de la dinámica temporal de formaciones palustres representativas de distintos grados de interacción con el agua subterránea (capítulo 6) se aborda a través del seguimiento simultáneo en agua superficial y subterránea de su evolución hídrica y concentración y composición iónica. Con ello, se pretende comprobar hasta qué punto los recursos hídricos subterráneos juegan un papel importante en la organización y estabilidad de ciertos humedales.

Asimismo, la elaboración de modelos conceptuales de funcionamiento realizados en este mismo capítulo pueden ayudar en último término a concretar criterios de valoración ecológica que constituyan un aporte a la gestión racional de los humedales, como se discute en el capítulo 8.





## ***2.1. DELIMITACION DEL CONCEPTO DE HUMEDAL.***

En el presente trabajo se estudian aquellos ecosistemas acuáticos continentales que normalmente son englobados bajo el término genérico de "humedal". Sin embargo al tratarse de sistemas altamente fluctuantes, pueden producirse ciertas ambigüedades en su definición, por lo que resulta imprescindible acotar el concepto de humedal utilizado a la hora de configurar el marco del estudio.

Aquí se ha adoptado la definición desarrollada por González Bernaldez et al. en 1988 por ser la que mejor refleja la personalidad ecológica de los humedales españoles. Según la misma, los humedales "constituyen espacial y temporalmente una anomalía hídrica positiva respecto a un entorno más seco. El exceso de humedad es lo suficientemente importante como para afectar a los procesos físico-químicos y biológicos del área en cuestión. Este efecto se refleja además en la presencia de suelos hidromorfos y una vegetación adaptada a vivir en condiciones de saturación más o menos permanentes. Generalmente, esas propiedades se traducen también por la presencia de una fauna y aprovechamientos humanos diferentes y en un paisaje con un grado elevado de calidad visual respecto a los terrenos adyacentes".

Aunque bajo esta definición los humedales abarcan un gran espectro ambiental en continuo, desde los humedecimientos de la zona de raíces de la vegetación hasta la presencia en superficie de láminas de agua con diferentes tamaños, persistencia y profundidad (González Bernaldez et al., 1989a) (Figura 2.1), a

efectos prácticos se pueden considerar dos tipos de ecosistemas con distinto régimen hidrológico y que definen con claridad los extremos de este gradiente:

- **Criptohumedales**, donde el agua líquida no se manifiesta en la superficie del terreno. En estas áreas, se establece por evaporación una circulación de agua desde la capa saturada o la franja capilar hasta la atmósfera o bien por evapotranspiración a través de la vegetación freatofítica, por lo que también reciben el nombre de **descargas evapotranspirativas**.

Suelen presentar suelos hidromorfos y vegetación adaptada a los horizontes saturados de agua.

Dentro de los criptohumedales, pueden incluirse los paisajes de bosques de galería o sotos, carrizales, juncuales, prados húmedos en vaguadas, etc.

- **Formaciones palustres**. Se trata de terrenos donde se mantiene una lámina de agua de una forma más o menos periódica, el tiempo suficiente como para que se desarrollen comunidades de organismos con adaptaciones específicas para la vida acuática.

Bajo esta denominación se presentan lagunas, charcas, navazos, ojos, balsas, tablas, etc.

En la definición utilizada aquí no se incluyen ni sistemas lacustres ni sistemas fluyentes, ya que la organización de sus procesos se produce de forma distinta: mientras que los humedales se organizan según la intensidad y amplitud de su fluctuación, los ríos lo hacen según un eje cabecera-desembocadura y los lagos según un eje luz-gravedad.

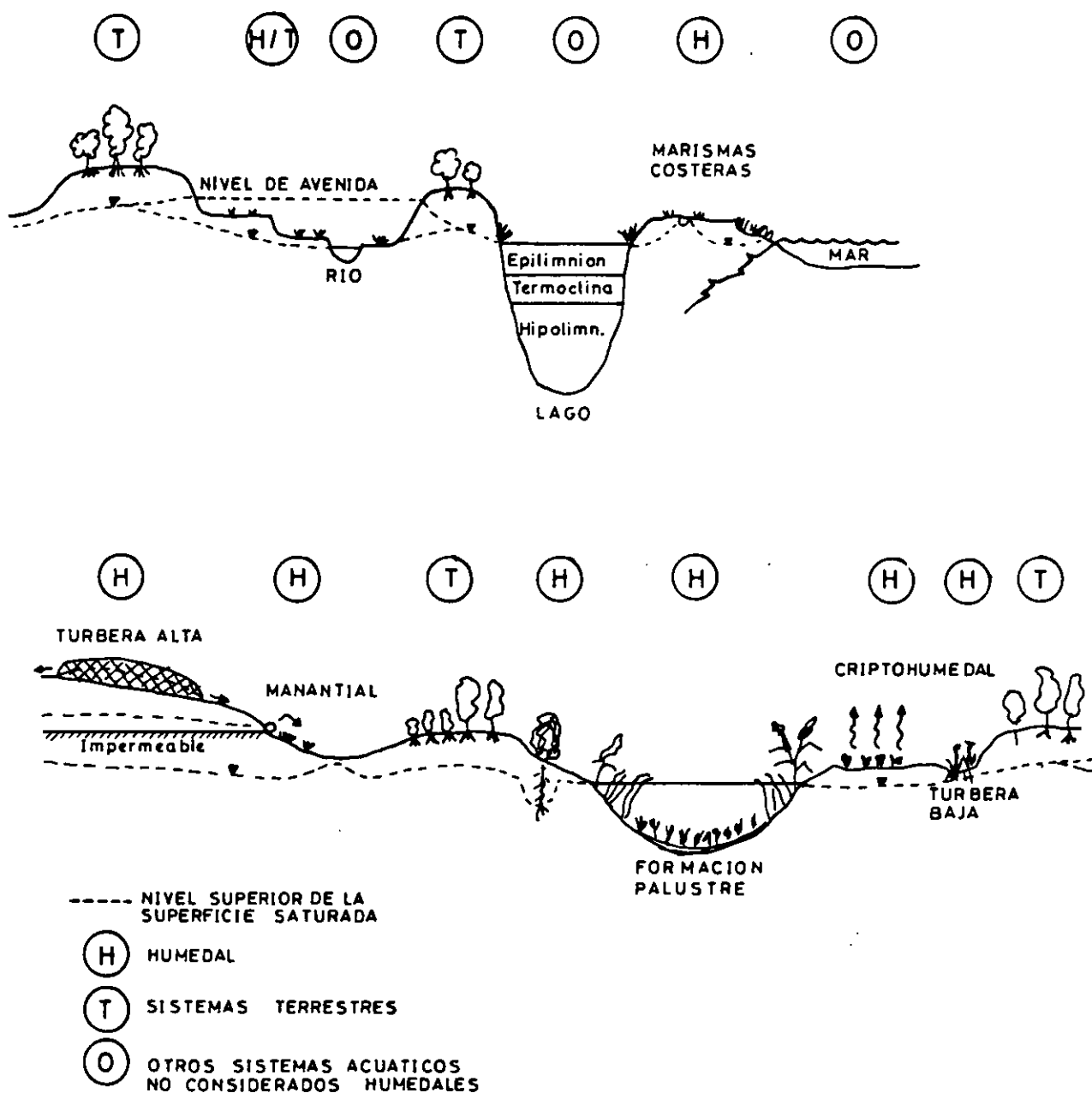


FIGURA 2.1. Corte esquemático del gradiente ambiental entre los medios terrestres y acuáticos que pone de manifiesto los distintos tipos de ambientes que quedan incluidos en el concepto de humedal (criptohumedales y formaciones palustres).

En este sentido, los humedales se distinguen de los lagos más por su poca profundidad (que impide la formación de una termoclina estable en verano) que por su extensión o volumen.

Existe otra clave para diferenciar estos tres sistemas: el río o el lago manifiestan una heterogeneidad en el espacio y una homogeneidad en el tiempo (exceptuando años catastróficos) que se revela por la diversidad de especies que presentan; sin embargo cada humedal es relativamente homogéneo en el espacio (casi todos los puntos de una laguna presentan iguales características) y heterogéneo en el tiempo; de ahí, que la diversidad de especies no sea muy elevada pero sí la cantidad de estrategias adaptativas a las fluctuaciones (Wiggins et al., 1980).

En definitiva, son el tiempo de residencia del agua, el grado de interacción entre el medio terrestre y el acuático y la organización de las comunidades bióticas asociadas los principales criterios distintivos para marcar los límites entre humedales y el resto de sistemas acuáticos epicontinentales.

Hasta hace pocos años, el estudio de estos sistemas fue abordado por varias disciplinas que, de forma independiente, elaboraron su propia definición de acuerdo con su especialidad. Así, aparecieron enfoques botánicos, hidrológicos o edafológicos que no hicieron más que enfatizar un único aspecto de los múltiples que interaccionan en estos sistemas.

A pesar de la reconocida importancia de encontrar una definición multidisciplinar (Tiner, 1989), no se ha

desarrollado hasta la fecha ninguna que satisfaga a todos los usuarios, cuyos objetivos y campos de interés pueden llegar a ser bien diferentes, desde la pura investigación científica a la gestión, pasando por cuestiones legales o económicas (Mitsch & Gosselink, 1986).

Por otro lado, la búsqueda de una definición que sirva de base para clasificar e inventariar a los humedales, responde más a criterios prácticos que puramente ecológicos y en términos generales se mantiene la dicotomía entre sistemas acuáticos profundos y relativamente estables (lacustres) frente a otros más someros y fluctuantes (palustres) (MAB, 1974; Cowardin et al., 1979).

La gran dificultad encontrada generalmente para delimitar el concepto de humedal, radica sobre todo en que al tratarse de terrenos de transición entre ambientes terrestres y acuáticos trazar límites puede resultar demasiado arbitrario, sobre todo a la hora de precisar hasta dónde llegan las condiciones húmedas (Mitsch & Gosselink, 1986), unido al gran dinamismo manifestado en el espacio y en el tiempo (Alonso et al., 1986).

- En el espacio se pueden describir una multitud de situaciones que forman un continuo y cuya única característica común es que presentan más humedad que los terrenos circundantes; así se abarca desde un bosque de ribera, acompañante de un cauce seco durante gran parte del año, hasta una laguna permanente, con un número infinito de situaciones intermedias entre ambas.

- En el tiempo, la característica que los define es la

gran fluctuación de la lámina de agua (considerando tanto la amplitud como la intensidad de la misma). En este sentido hay que destacar que pequeñas fluctuaciones en el nivel de agua se ven acompañadas de grandes cambios horizontales en sus características ecológicas, debido fundamentalmente a la escasa profundidad (Margalef, 1987). Los cambios anuales e interanuales son más acusados, con diferencia, en los humedales que en cualquier otro sistema acuático continental. En definitiva, son sistemas que evolucionan muy rápidamente adaptándose continuamente a los cambios del medio, lo que provoca el aumento de su propia diversidad (Custodio, 1987).

A pesar de las dificultades encontradas para delimitar el término de humedal, se pueden describir algunos rasgos comunes a todos estos sistemas que se incluyen en las definiciones vigentes y que pueden resumirse en:

- Presencia de agua ya sea en forma de láminas someras o suelos saturados.
- Presencia de suelos únicos, diferentes a las tierras adyacentes.
- Mantenimiento de una biota característica, adaptada a las condiciones de saturación.

Hay que resaltar sin embargo, que es la primera característica mencionada, expresada a través del régimen hidrológico, la que crea las condiciones determinantes para que un humedal adquiera entidad propia frente a ecosistemas adyacentes terrestres o acuáticos (Gosselink & Turner, 1978; Mitsch &

Gosselink, 1986; Novitzki, 1989).

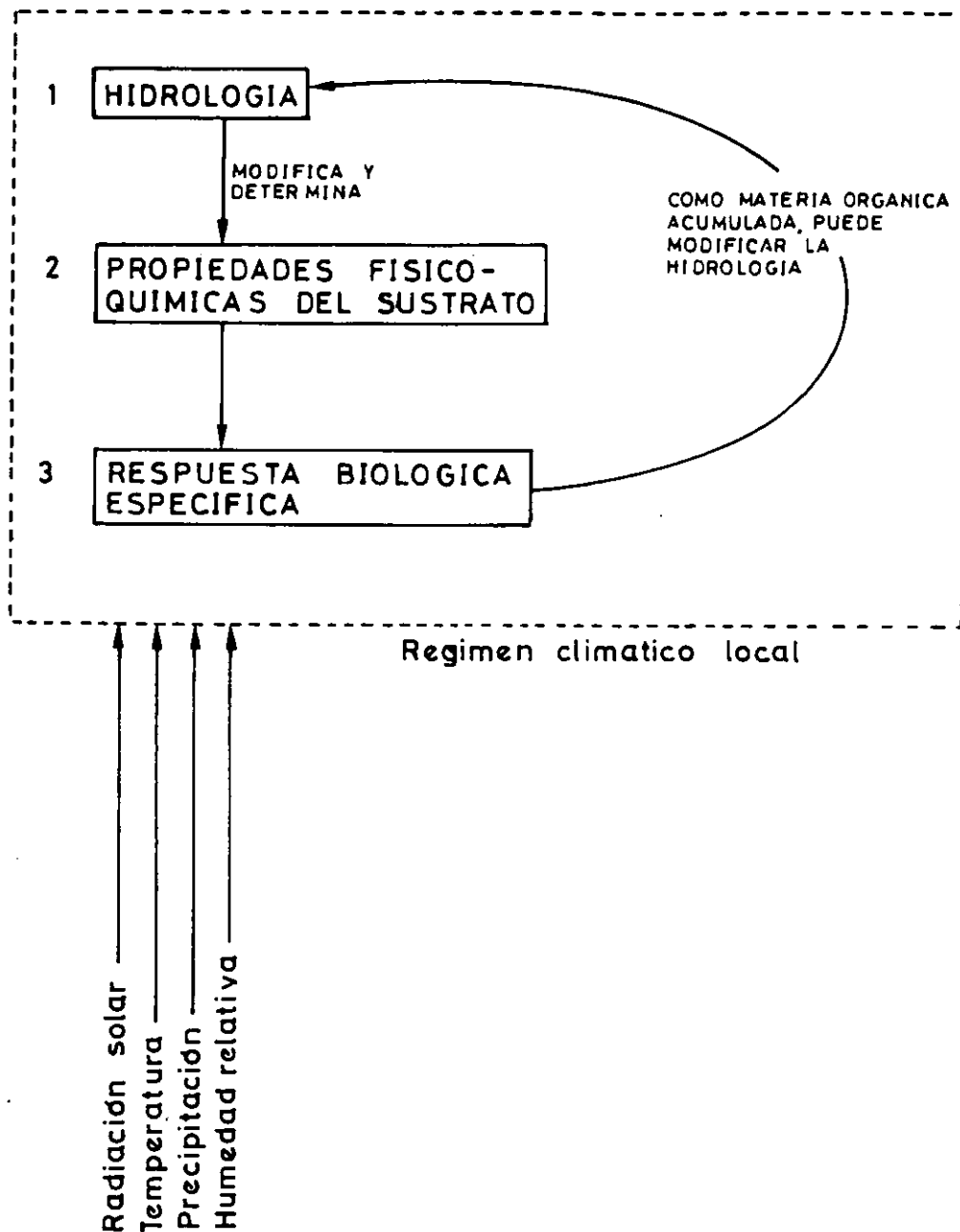
En efecto, la profundidad y origen del agua, la velocidad de flujo, así como la tasa de renovación y la frecuencia de la inundación, influyen decisivamente en las características físico-químicas del humedal, y son el factor prioritario que selecciona la presencia de determinadas comunidades de organismos (Figura 2.2), teniendo en cuenta que el agua es el vehículo fundamental de entrada y salida de materia y energía a estos ecosistemas como reconocen gran número de autores, entre los que cabe citarse a Dooge (1975), Gosselink & Turner (1978), Henjy & Husak (1978), Carter et al. (1979), Greeson et al. (1979), Ivanov (1981), Van der Valk (1981), Gopal et al. (1982), Howard-Williams (1985), LaBaugh (1986) y Koerselman (1989).

Sin embargo, a pesar de la reconocida importancia de la hidrología en este tipo de estudios, lo cierto es que no siempre se le ha prestado la misma atención. A continuación se revisa el papel desempeñado por este tipo de perspectiva en los estudios limnológicos.

## ***2.2. ESTUDIOS DE INTERACCION ENTRE AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA.***

Es interesante observar, la gran proliferación en la literatura de revisiones sobre el interés de la componente hidrológica en los estudios de humedales (Linacre, 1976; Anderson & Munter, 1981; Knight et al., 1985; Carter, 1986; González Bernaldez, 1987; Hollands, 1987; Carter & Novitzki, 1988) que contrasta sin





**FIGURA 2.2. Modelo conceptual general del papel desempeñado por la hidrología en los humedales (modificado de Gosselink & Turner, 1978)**

embargo con los pocos estudios concretos realizados donde se analice información hidrológica cuantitativa de diferentes tipos de humedales (LaBaugh, 1986; Mitsch & Gosselink, 1986).

De todas las funciones hidrológicas que afectan a un humedal, quizá sea el agua subterránea y su interacción con los sistemas superficiales el que suscita mayor interés, no sólo en los balances hidrológicos sino también en los químicos (Born et al., 1974; Larson et al., 1975; John et al., 1977; Lee, 1977; Munter, 1979; Mitsch & Gosselink, 1986).

La interpretación de fenómenos de carácter húmedo observados en el campo y su relación con las aguas subterráneas ya fue apuntada a principios de siglo por algunos autores (Meinzer, 1923; Horton, 1933) de forma intuitiva, puesto que los conocimientos sobre funcionamiento hidrogeológico eran aún insuficientes en aquel momento. En España y según la revisión realizada por Montes & Martino (1987) también se produjeron este tipo de descripciones (Calderón, 1888; Jessen, 1946; Huguet del Villar, 1950; Plans, 1969), siendo Quirantes (1965) el primero que menciona expresamente el papel desempeñado por las aguas subterráneas en el núcleo de lagunas de Bujaraloz-Sástago.

La trascendencia de los trabajos de Hubbert (1940) y Toth (1963) en el campo de los modelos hidrogeológicos marcó la trayectoria de toda una serie de análisis teóricos posteriores que modelizaron patrones de flujo de agua subterránea y su relación con las aguas superficiales, en condiciones hidrogeológicas variadas. Estos autores, mediante la aplicación de la ley de Darcy (1856), describieron las características

generales que tendrían las áreas de recarga y descarga de acuíferos. Posteriormente la superposición de estos modelos a la topografía, reflejó la existencia de flujos de agua subterránea de diferentes escalas.

Los primeros trabajos que examinaron el problema de determinar los flujos de agua subterránea en relación con las aguas superficiales fueron desarrollados en Canadá por Meyboom (1966) y Toth (1966).

Estudios similares fueron realizados posteriormente por Williams (1968) en Estados Unidos y Schumann (1973) en Alemania.

Hay que destacar que la mayoría de estos estudios pioneros se realizaron en sistemas lacustres.

Freeze & Witherspoon (1966) incorporaron al modelo propuesto por Toth otras características, como la existencia de heterogeneidades y anisotropías en el terreno.

Born et al., (1974) ya predecía la existencia de varios tipos de lagos a partir de los modelos teóricos elaborados hasta ese momento, esto es, lagos de recarga, de descarga y mixtos que serían aquellos que reciben agua subterránea por una parte del lago y recargan el acuífero por otra.

Otros modelos hidrológicos de interacción entre lagos y agua subterránea fueron realizados por Larson et al. (1975) y McBride & Pfannkuch (1975).

Los trabajos de Winter (1976, 1978, 1981a)

proporcionaron nuevas claves para la interpretación de las funciones de descarga y recarga de agua en lagos y humedales. Mediante simulaciones digitalizadas en dos y tres dimensiones, se precisaron las situaciones en que se producían las salidas y entradas de agua a un sistema superficial en función de la disposición de los flujos subterráneos, así como las zonas más probables para que dichos fenómenos se produjeran.

En España, son Octavio & López-Camacho (1976) los primeros autores que realizan un modelo que relaciona las aguas subterráneas con algunas lagunas de la provincia de Toledo.

En la actualidad comienzan a proliferar trabajos de aplicación de modelos hidrológicos en estudios de campo. En este sentido, es en Estados Unidos donde el número de trabajos publicados sobre este tema supera con mucho al resto de la bibliografía mundial. Los lugares escogidos para llevar a cabo estas investigaciones siguen siendo preferentemente lagos (McBride & Pfannkuch, 1975; Lee et al., 1980; Munter & Anderson, 1981; Winter, 1983) y pequeños arroyos de cabecera (Dunne & Black, 1970; Stephenson & Freeze, 1974), mientras que los humedales tratados en este tipo de trabajos de interacción suelen ser zonas turbosas o pantanosas, dejando de lado a los humedales costeros (Harvey et al., 1987) y a otros tipos de áreas encharcables.

También se empiezan a llevar a cabo programas de seguimiento sincrónico de aguas superficiales y subterráneas para definir los aspectos hidrológicos de humedales concretos. Entre ellos cabe citar los realizados por Nuttle & Harvey (1987), Siegel (1983),

Cohen et al. (1984), Mitsch & Gosselink (1986), Siegel & Glaser (1987), Winchester (1987), Day et al. (1988), Brown (1989) y Lodge et al. (1989).

Como señalan algunos autores (Winter, 1977; Hollands, 1987; Siegel, 1988), el uso de *piezómetros* para la realización de este tipo de investigaciones empieza a considerarse imprescindible, como instrumento básico para medir el potencial hidráulico en las proximidades del humedal.

Aunque los resultados obtenidos con este tipo de metodología, deben ser cuidadosamente interpretados, su no instalación no está en ningún caso justificada, excepto si se usan otros aparatos de medida más complejos, ya que como se ha comentado, en la actualidad se considera que los aspectos hidrológicos deben estar presentes en cualquier investigación sobre humedales, aunque sea de forma rudimentaria (Custodio & Llamas, 1983; Mitsch & Gosselink, 1986).

El conocimiento hidrológico de un humedal se aborda en ocasiones a través del estudio de otros aspectos sobre los que tiene incidencia directa la hidrología, como la hidroquímica o los organismos presentes en el humedal, aunque son escasos los trabajos que hagan referencia a este tipo de aspectos en relación con los procesos hidrológicos. Zektzer (1973a) discutió el papel que podía tener el agua subterránea en los balances de sales del lago Baikal y el Mar Caspio de forma algo intuitiva y LaBaugh (1986) establece correspondencias entre las características hidroquímicas de humedales y aguas subterráneas y las particularidades del régimen hidrológico.

Los estudios de caracter limnológico que aborden el funcionamiento de los humedales en consonancia con los aspectos hidrológicos son también escasos (Anderson & Munter, 1981) y como señala Winter (1977), en general se realizan de forma inadecuada.

Recientemente, se han relacionado las aguas subterráneas con los humedales a través de patrones de vegetación con diferentes afinidades hídricas y salinas, comprobando que la distribución de estas plantas freatofíticas responde con gran exactitud a la hidroquímica de los acuíferos y a las fluctuaciones de la superficie freática (González Bernaldez et al., 1987a; Siegel & Glaser, 1987)

A partir de lo expuesto en estas líneas puede llegar a pensarse que el concurso de las aguas subterráneas resulta imprescindible para que se origine un ecosistema húmedo, sin embargo en ocasiones los factores hidrológicos superficiales cobran un papel preponderante como se comenta a continuación.

### ***2.3. SITUACIONES HIDROLOGICAS FAVORABLES PARA LA APARICION DE HUMEDALES.***

A pesar de que los humedales pueden aparecer en regímenes físicos bien diferentes e incluir una gran diversidad de ecosistemas, parece claro que su distribución en el paisaje no es fortuita. Únicamente la combinación espacio-temporal de determinados aspectos geomorfológicos e hidrológicos, se traduce en la presencia de un humedal.

En efecto, un enclave fisiográfico favorable es sólo uno de los requisitos para que se desarrolle un humedal, ya que además debe poseer un importante aporte de agua (Novitzki, 1989), subterránea, superficial o una combinación de ambas.

Winter & Woo (1988) realizan una revisión de los tipos de territorios propicios para la aparición de áreas de acumulación de agua que proporcionarán parte del soporte físico del humedal. En líneas generales, estos enclaves pueden asimilarse también a la realidad de los humedales españoles y pueden concretarse en:

- Depresiones topográficas, cuyo origen puede ser muy diverso, desde procesos glaciares, barreras físicas que impiden el drenaje (barras fluviales o costeras, morrenas, etc.) a fenómenos de subsidencia.
- Discontinuidades en pendientes.
- Características litológicas que impiden la infiltración.

En numerosas ocasiones la estratigrafía de un territorio puede favorecer la acumulación de agua si existen niveles de material impermeable próximos a la superficie.

La combinación de estos enclaves con la presencia de agua ya sea de origen superficial o subterráneo, puede producir una gran diversidad de situaciones hídricas positivas en el paisaje con respecto a los terrenos circundantes que se resumen en la Figura 2.3.

Por un lado, el agua procedente de la precipitación

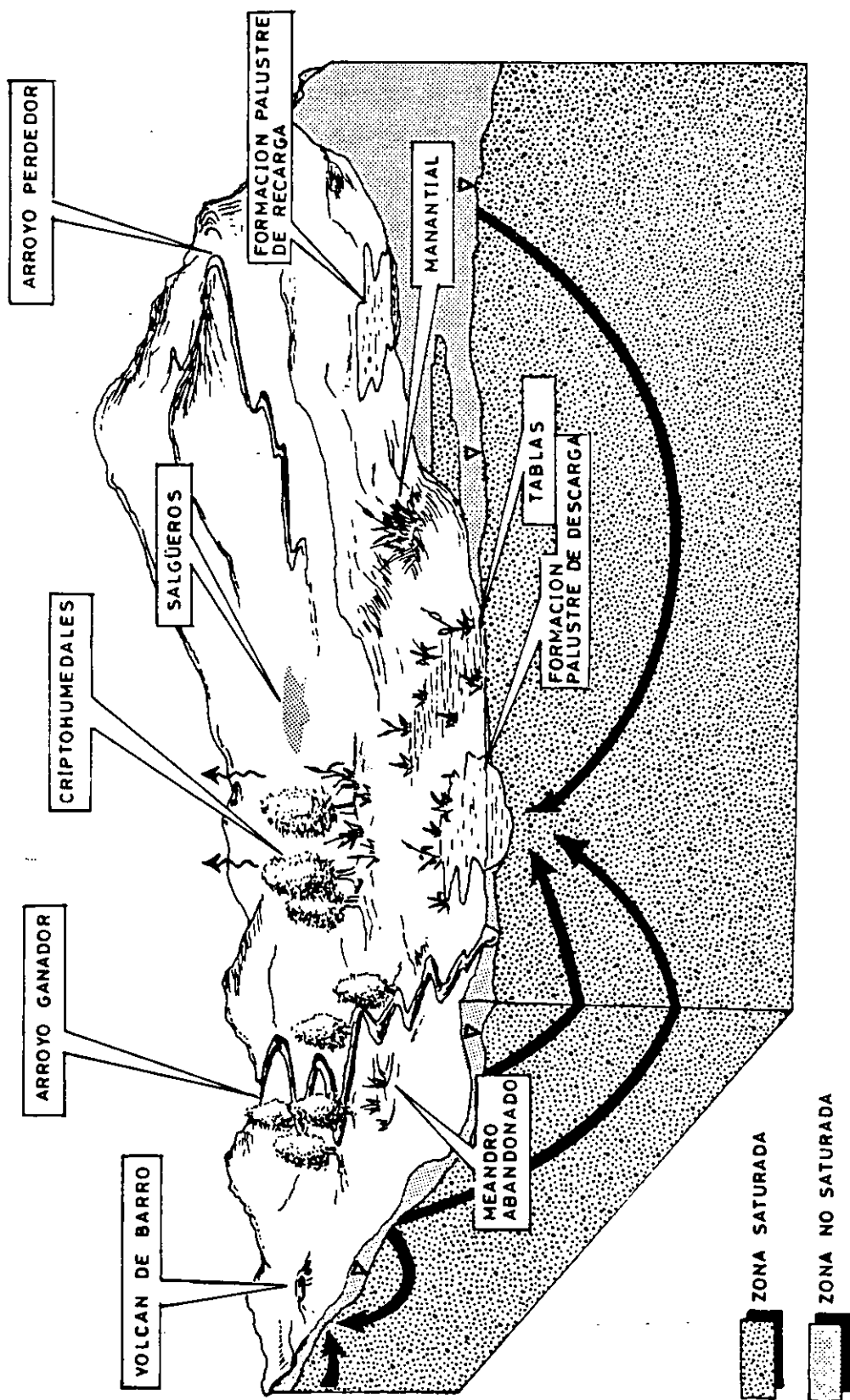


FIGURA 2.3. Diversos tipos de ecosistemas húmedos que pueden aparecer en el paisaje bajo la influencia de agua superficial, subterránea o el concurso de ambas.



atmosférica y escorrentía superficial puede ocasionar la presencia de formaciones palustres de recarga y arroyos perdedores de carácter temporal. En ambos tipos de sistemas el agua terminará evaporándose e infiltrándose en el terreno recargando los acuíferos subyacentes.

La descarga de acuíferos más superficiales o someros en laderas y discontinuidades del terreno puede producir la aparición de manantiales o criptohumedales a media ladera.

Acuíferos de mayor profundidad y extensión, donde pueden coexistir flujos de agua subterránea de distinta longitud, tal y como describió Toth (1972) pueden manifestar su descarga en superficie en forma de humedales de muy diversa índole: formaciones palustres de descarga cuyas cubetas interceptan el nivel freático, criptohumedales, volcanes de barro, eflorescencias salinas (salgüeros) si el agua que descarga en superficie es mineralizada y la alta evaporación impide el mantenimiento de una lámina de agua estable cierto tiempo, encharcamientos someros (tablas) en regiones de poco relieve y donde el nivel freático se encuentra muy próximo a la superficie.

Los flujos de agua subterránea también pueden descargar en arroyos (que reciben entonces el nombre de ganadores) y en meandros abandonados originándose de esta forma formaciones palustres más asociadas a la dinámica fluvial.

En este punto, es importante mencionar otro aspecto relacionado con la presencia de agua subterránea que puede llegar a impedir la infiltración de forma que el

agua se acumule en superficie.

En efecto, la presencia de acuíferos colgados o el flujo ascendente de agua subterránea en áreas de descarga de acuíferos más profundos, puede ocasionar el fenómeno denominado "drenaje impedido".

En este sentido, es interesante mencionar las últimas revisiones sobre el concepto de *endorreísmo*: si tradicionalmente una región endorreica era explicada únicamente a través de procesos de tipo superficial (condiciones climáticas áridas o semiáridas, escasez de cauces y poca organización de las redes de drenaje) en la actualidad, la participación del agua subterránea y el mecanismo asociado de drenaje impedido son fundamentales para describir estos fenómenos (González Bernaldez, 1987).

#### **2.4. UTILIZACION DE CRITERIOS HIDROLOGICOS EN CLASIFICACION DE HUMEDALES.**

Las clasificaciones e inventarios de humedales están íntimamente unidos a la definición y acotación del ecosistema que se utilice.

De hecho, las mismas dificultades encontradas para delimitar el concepto de humedal (apartado 2.1) se suelen presentar a la hora de decidir los criterios que servirán para su clasificación.

Además, los resultados de un inventario y una

clasificación varían según se esté utilizando el concepto de humedal como área o como elemento fisionómico (Cowardin, 1982). En ocasiones, se llega a una gran confusión porque se utiliza la definición de humedal referente a un área o hábitat y sin embargo los criterios empleados para la clasificación se refieren a atributos de las cubetas concretas. Este es por ejemplo el caso del trabajo realizado por Stewart & Kantrud (1971) para humedales de Estados Unidos.

En general, las clasificaciones de humedales realizadas hasta la fecha utilizan criterios de diversa naturaleza incorporando casi siempre los aspectos hidrológicos de forma secundaria.

Los primeros pasos en la clasificación de humedales, se dieron a principios de siglo para turberas de Europa y América del Norte. Davis (1907) clasificó los "bogs" de Michigan de acuerdo a tres criterios: fisiografía de la cuenca, origen y vegetación presente en la superficie. Moore & Bellamy (1974) basándose en los trabajos de Weber (1908), Potonie (1908) y Kulczynski (1949) describieron siete tipos de turberas en Europa basándose en características hidrológicas.

Estas clasificaciones sirvieron de modelo para otras realizadas posteriormente con humedales, considerados como áreas homogéneas en cuanto a algunas de sus características y no como enclaves individualizados (Cowardin, 1982).

Las más numerosas son las realizadas para humedales de Estados Unidos y Canadá que han utilizado la permanencia del agua y la cobertura vegetal como

criterios básicos para su realización (Martin et al, 1953; Shaw & Fredine, 1956; Adams & Zoltai, 1969; Millar, 1973; Golet & Larson, 1974; Cowardin et al, 1979). Sin embargo, ya algunos autores (Evans & Black, 1956; Gollop, 1965) reconocieron en su momento la baja calidad de la vegetación como indicador de la permanencia del agua y propusieron la utilización de otros criterios adicionales que indicasen las fluctuaciones de las láminas de agua. En este sentido, la clasificación realizada para humedales de Estados Unidos por Millar (1973) aunque introduce el factor vegetación, incorpora modificaciones a la hora de interpretar el régimen hídrico.

Todos estos trabajos basados en comunidades vegetales y permanencia del agua no son, sin embargo demasiado útiles para evaluar la interacción del agua subterránea con los humedales excepto en los casos en que la vegetación sea muy sensible a la química del agua (Siegel, 1988).

Las clasificaciones basadas únicamente en consideraciones hidrológicas, tampoco evalúan adecuadamente la relación recarga-descarga de los humedales, si se centran sólo en la fisiografía local, sin relacionarlos con el sistema hidrogeológico regional (Novitzki, 1982).

Entre las clasificaciones de humedales realizadas con criterios hidrológicos y más concretamente, las que diferencian sistemas acuáticos de descarga (o subterráneos) y de recarga (o superficiales) pueden citarse las realizadas por Novitzki (1979) y Toth (1984) para Estados Unidos y en España por Custodio (1987).

Las tipologías realizadas con humedales españoles, han atendido frecuentemente a aquellos factores del medio físico, afectados de mayor variabilidad y fluctuación (Alonso, 1987). Caben destacar en este sentido, las clasificaciones realizadas por Alonso & Comelles (1981), González Bernaldez et al. (1988) y DGOH (1990). En ellas se hace especial referencia a aspectos del hábitat físico, características físico-químicas de las aguas y estructura de las comunidades bióticas asociadas, haciendo poca referencia a aspectos hidrológicos.

#### ***2.5. IMPORTANCIA DE LA PERSPECTIVA HIDROLOGICA EN LA GESTION DE HUMEDALES.***

A pesar de que durante los últimos años ha aumentado el reconocimiento de los valores que representan los humedales y el deseo de proteger los procesos que en ellos se desarrollan, la capacidad para gestionar estos sistemas, se ha visto limitada fundamentalmente por el desconocimiento de sus aspectos hidrológicos (Novitzki, 1989).

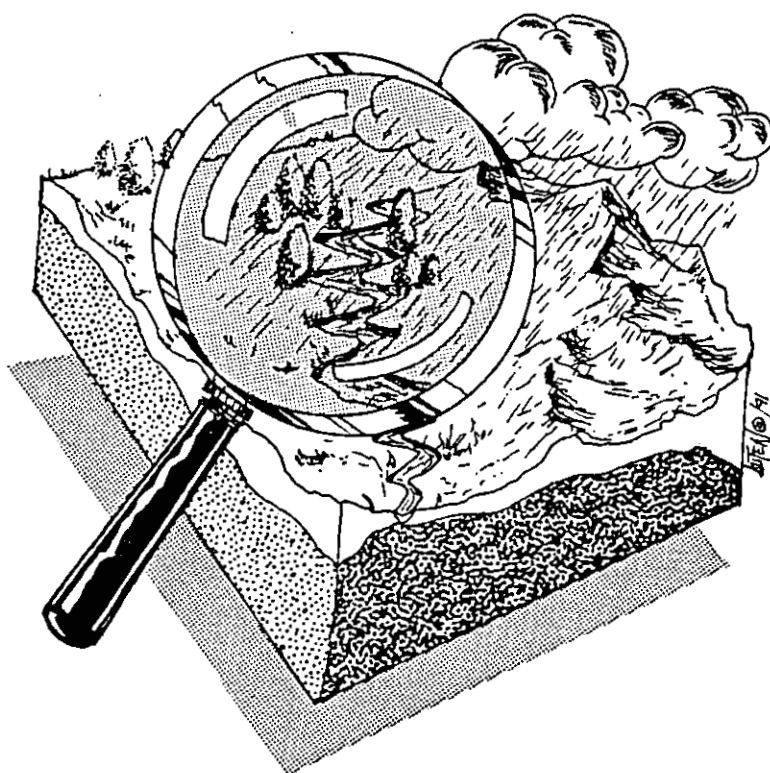
En efecto, cualquier factor que perturbe la intensidad, frecuencia y grado de predicibilidad de las inundaciones, incidirá de forma negativa sobre la estructura y funcionamiento de todo el sistema.

Está claro que el conocimiento de las rutas seguidas por el agua desde y hacia el humedal, facilita la toma de decisiones sobre el manejo de estos sistemas

con conocimiento de causa.

Ante las continuas denuncias que se suceden por la inminente pérdida de humedales a causa de la sobreexplotación de acuíferos, puede llegar a pensarse que todos los sistemas húmedos está ligados a este tipo de descargas de agua. Por ello, las actuaciones sobre encharcamientos debidos únicamente a agentes hidrológicos superficiales quedan en ocasiones relegadas a segundo término. Precisamente, los estudios hidrológicos servirían para distinguir, al menos, estos dos grandes grupos de humedales de forma que se pueda enfocar su gestión desde perspectivas adecuadas.

En cualquier caso, la conservación y gestión de estos sistemas debe ser enfocada al mantenimiento de sus niveles naturales de fluctuación (Margalef, 1987).



**3. LA FACIES ARCOSICA DEL  
ACUIFERO DE MADRID.  
DELIMITACION DE UNIDADES  
ECOLOGICAS HOMOGENEAS  
EN RELACION A FACTORES  
SUPERFICIALES Y  
SUBTERRANEOS DEL MEDIO  
FISICO.**

### **3.1. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO**

#### **3.1.1. Características geográficas**

Situada en la cuenca del río Tajo, el área conocida como acuífero terciario de la Cuenca de Madrid (Figura 3.1) posee una superficie aproximada de 6.000 Km<sup>2</sup>, con un espesor que oscila entre 3.000 m en la vertical de Las Rozas (Fernandez Uría et al., 1985; Llamas, 1986) y 200 m en las proximidades de Talavera de la Reina (Cadavid, 1977).

Dicha zona está constituida por la facies arcósica o facies Madrid, donde se ha centrado el presente estudio y la facies Guadalajara, de carácter más arcilloso, que con una litología más heterogénea, provoca comportamientos hidrogeológicos particulares en el acuífero, razón por la que ha quedado excluida de este trabajo.

El área de estudio, posee una superfie aproximada de 3.700 km<sup>2</sup>, formada por una franja de 130 km de longitud y 40 km de anchura máxima. Queda limitada al Norte por la Sierras de Guadarrama y Gredos, mientras que al Sur, queda difusamente delimitada por los terrenos evaporíticos del centro de la cuenca sedimentaria de Madrid. Se ha considerado al río Jarama como su límite oriental, ya que separa la facies Madrid de la de Guadalajara.

Por el Oeste la zona de estudio se estrangula en el "Estrecho de Talavera" (Hernández Pacheco, 1955)



lugar donde casi convergen el Sistema Central y los Montes de Toledo; es en esta zona donde se sitúa el extremo distal del acuífero de Madrid.

El área de estudio, posee una topografía suave y ondulada con un descenso regional progresivo en dirección NE-SW. Alcanza cotas máximas de 760 m en el interfluvio Manzanares-Jarama y mínimos de 360 m en la confluencia del Alberche con el río Tajo, en las cercanías de Talavera de la Reina (Figura 3.2). Esta ligera pendiente regional es consecuencia del basculamiento que sufrió la Meseta a finales del Terciario (IGME, 1971).

La red de drenaje así formada diseccionó el relieve de forma importante, sobre todo, en comparación con otras cuencas de origen igualmente sedimentario, como es el caso de la cuenca del río Duero (González Bernáldez et al., 1987b).

En el área considerada para este estudio, queda tan sólo una región de pequeñas dimensiones con síntomas de endorreísmo incipiente en la comarca de Sta. Olalla-Maqueda-Hormigos (González Bernaldez, 1987; Herrera, 1987) (Figura 3.3).

La red fluvial que vierte sus aguas al Tajo está más desarrollada en su margen derecha, ya que en el último periodo geológico este río se ha ido desplazando progresivamente hacia el Sur. En esta margen se encuentran los cauces más importantes que surcan el área de estudio: el río Jarama (el más caudaloso de ellos con un 62,9% de la aportación en régimen natural de los ríos afluentes de la margen derecha del Tajo), con su afluente el Manzanares; el arroyo Guatén, el río

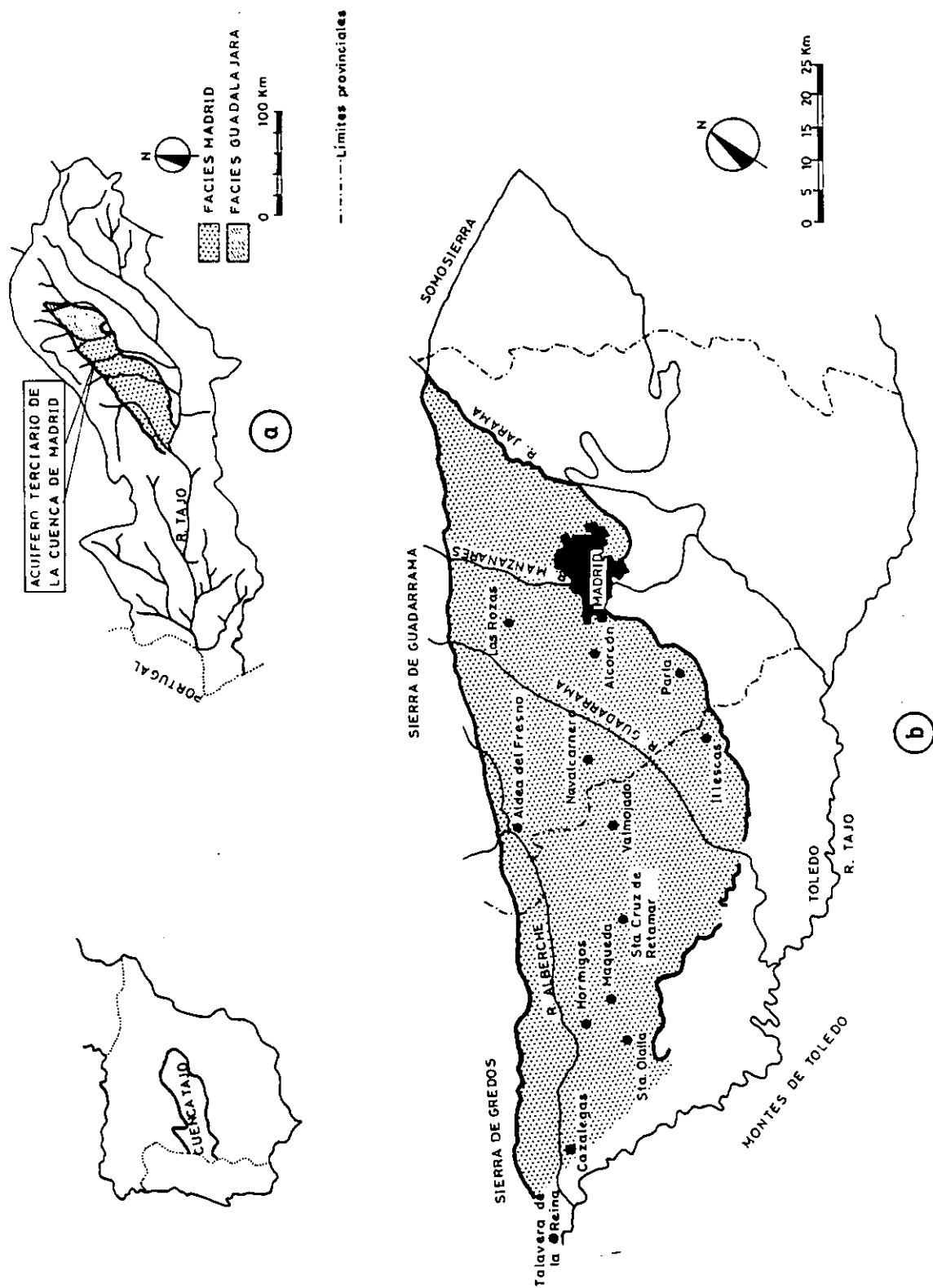


FIGURA 3.1. Los límites del área de estudio (b) coinciden con la facies Madrid del acuífero terciario de la cuenca de Madrid (a), que rellena la fosa media del río Tago.

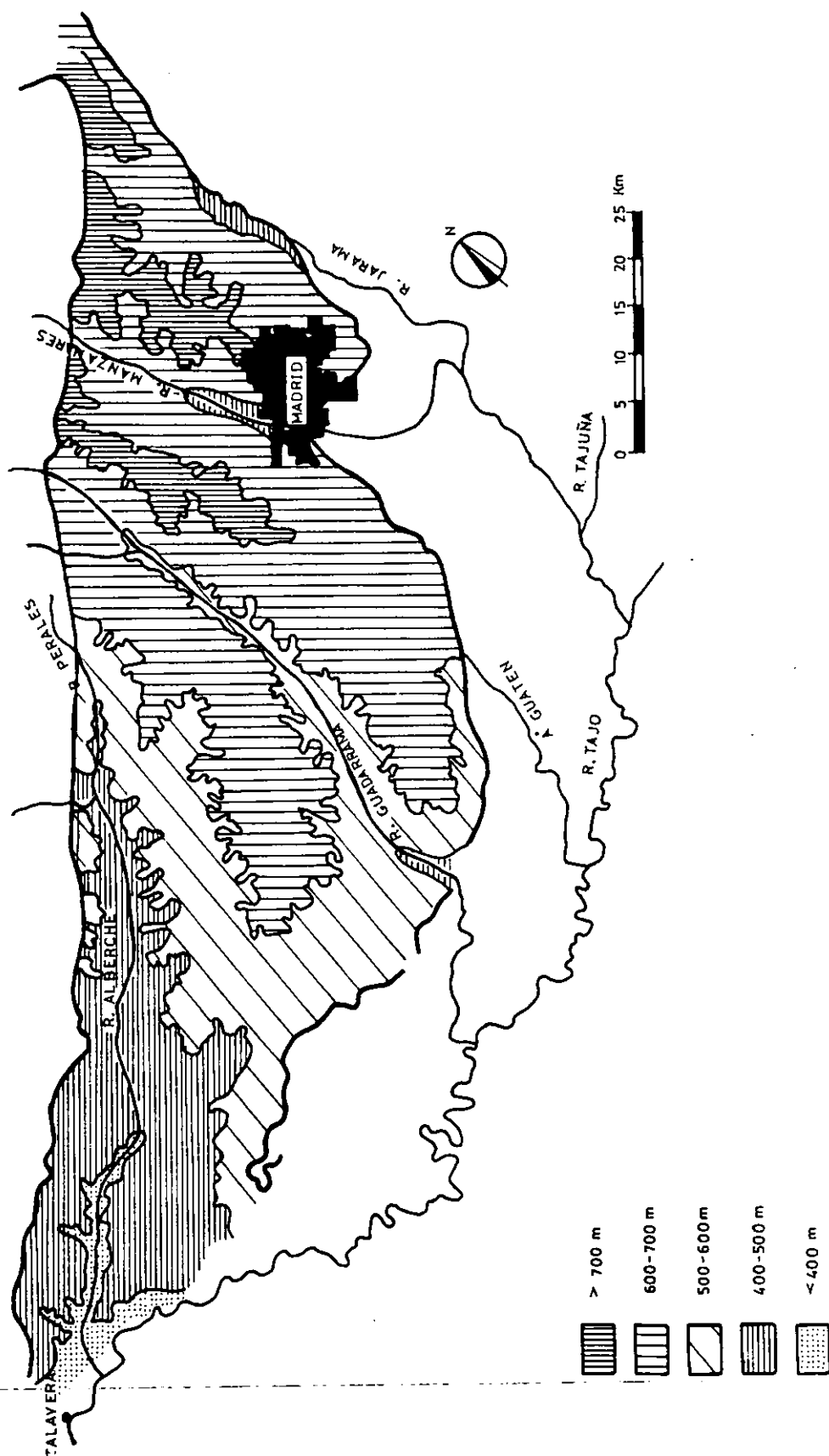


FIGURA 3.2. Mapa hipsométrico del área de estudio. El descenso regional en dirección NE-SW es de unos 400 m para un recorrido de aproximadamente 130 Km.



Guadarrama (6,1%) con el Aulencia y el río Alberche (31%) con el Perales (Aguiló, 1983). (Figura 3.3).

Sobre esta región domina un clima de tipo mediterráneo continental (Font, 1983), con régimen hídrico semiárido (Allúe, 1966).

La cuenca baja del Alberche está más abierta a la influencia atlántica que el resto de la Cuenca de Madrid, donde los sistemas montañosos galaico cantábricos y el Sistema Central impiden que penetren los vientos del noroeste, mientras que el Sistema Ibérico actúa de pantalla para las masas de aire que proceden del Mediterráneo.

En el Alberche, la estación de máxima precipitación es el invierno, puesto que la mayor parte de las lluvias que tienen lugar en esta estación son causadas por perturbaciones que se desarrollan en el Atlántico arrastradas por los vientos del suroeste y oeste (vientos que se conocen en la zona con el nombre de "ábregos" o "llovedores"). En conjunto, la cuenca baja del Alberche es algo más húmeda y cálida dentro de la Cuenca de Madrid (Figura 3.4). Otro fenómeno diferenciador es la frecuencia de las heladas; alrededor de 30 días al año, frente a los 70 días del resto de la zona.

### **3.1.2. Características geológicas**

La mayor parte de los materiales geológicos del área de estudio son arenas arcósicas que rellenaron la

fosa del Tajo durante el Mioceno, por coalescencia de enormes abanicos aluviales (López Vera, 1977; Villarroja Gil, 1977) con radios de unos 30 Km y que solapándose entre sí, con un frente común de aproximadamente 200 Km, partían del Sistema Central y llegaban a las orillas de las lagunas que ocupaban el centro de la cuenca (IGME, 1971). Las características litológicas de los materiales detríticos están por tanto íntimamente ligadas a la proximidad de su área madre. El medio de sedimentación en el que se rellenó la fosa tectónica del Tajo era de tipo continental, con régimen endorreico o semiendorreico y con aportes detríticos procedentes del Sistema Central (Hernandez Pacheco et al., 1969; Capote & Carro, 1971; Vegas & Perez, 1974; Llamas & López Vera, 1975; San José Lancha, 1976).

Dentro de la facies arcósica o facies Madrid, la proporción de arenas y arcillas es variable, distinguiéndose en el área de estudio tres unidades litoestatigráficas diferentes: la unidad Madrid (Fernandez Uría, 1984; Rubio, 1984), llamada también Formación Madrid (López Vera, 1975) y subfacies D2 (Martínez Alfaro, 1977), formada por arcosas feldespáticas en una matriz arcillosa, en la que la relación arena/arcilla para una columna tipo es de 0,76 (Fernandez Uría, 1984); la unidad Tosco (Sastre, 1978; Fernández Uría, 1984; Rubio, 1984) también llamada Formación Tosco (López Vera, 1975) y subfacies D1 (Martínez Alfaro, 1977), donde las arcillas y limos predominan sobre las arcosas, siendo la relación arena/arcilla de 0,50 (Fernandez Uría, 1984); por último, la unidad Cazalegas que está formada por materiales arcillosos fundamentalmente, aflorando en las proximidades de Cazalegas (Figura 3.5; Tabla 3.1).

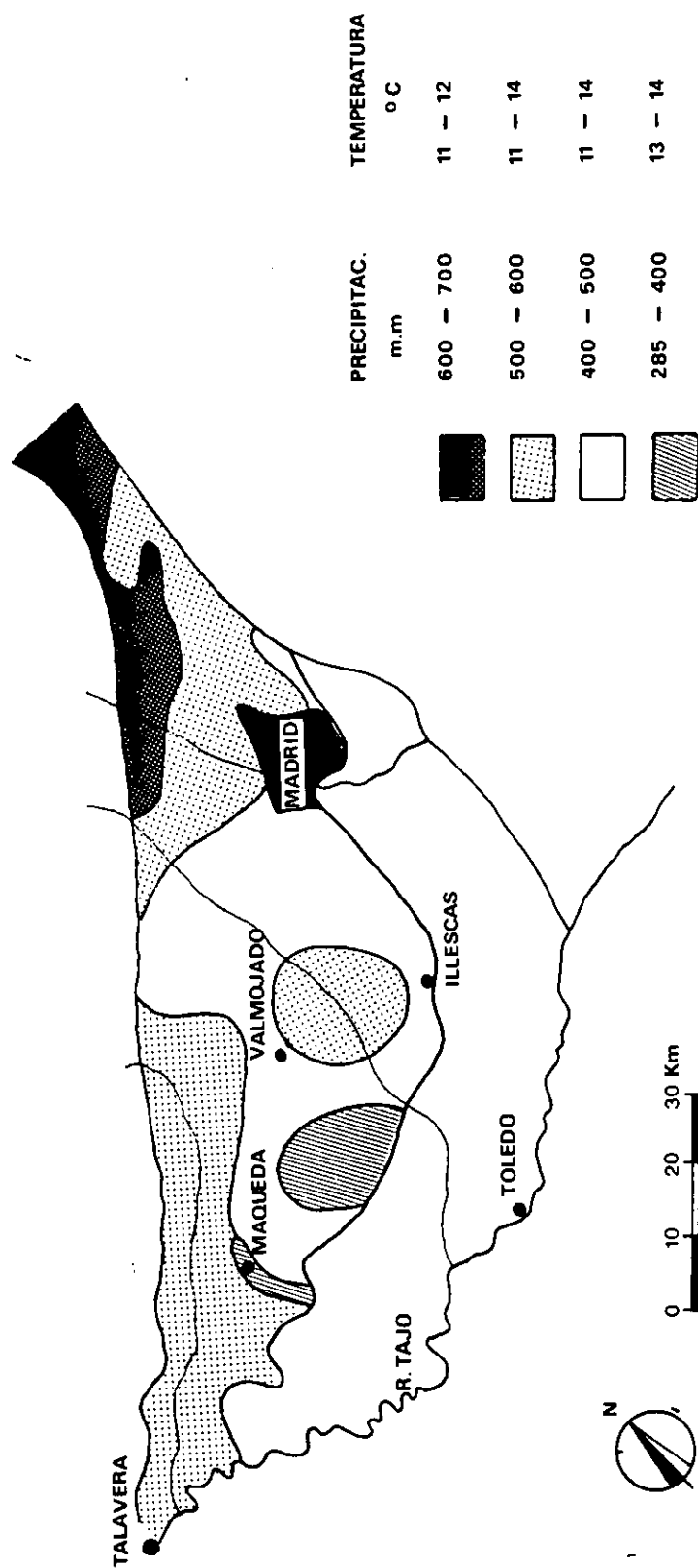


FIGURA 3.4. Regiones con diferencias en temperatura y precipitación para el área de estudio.

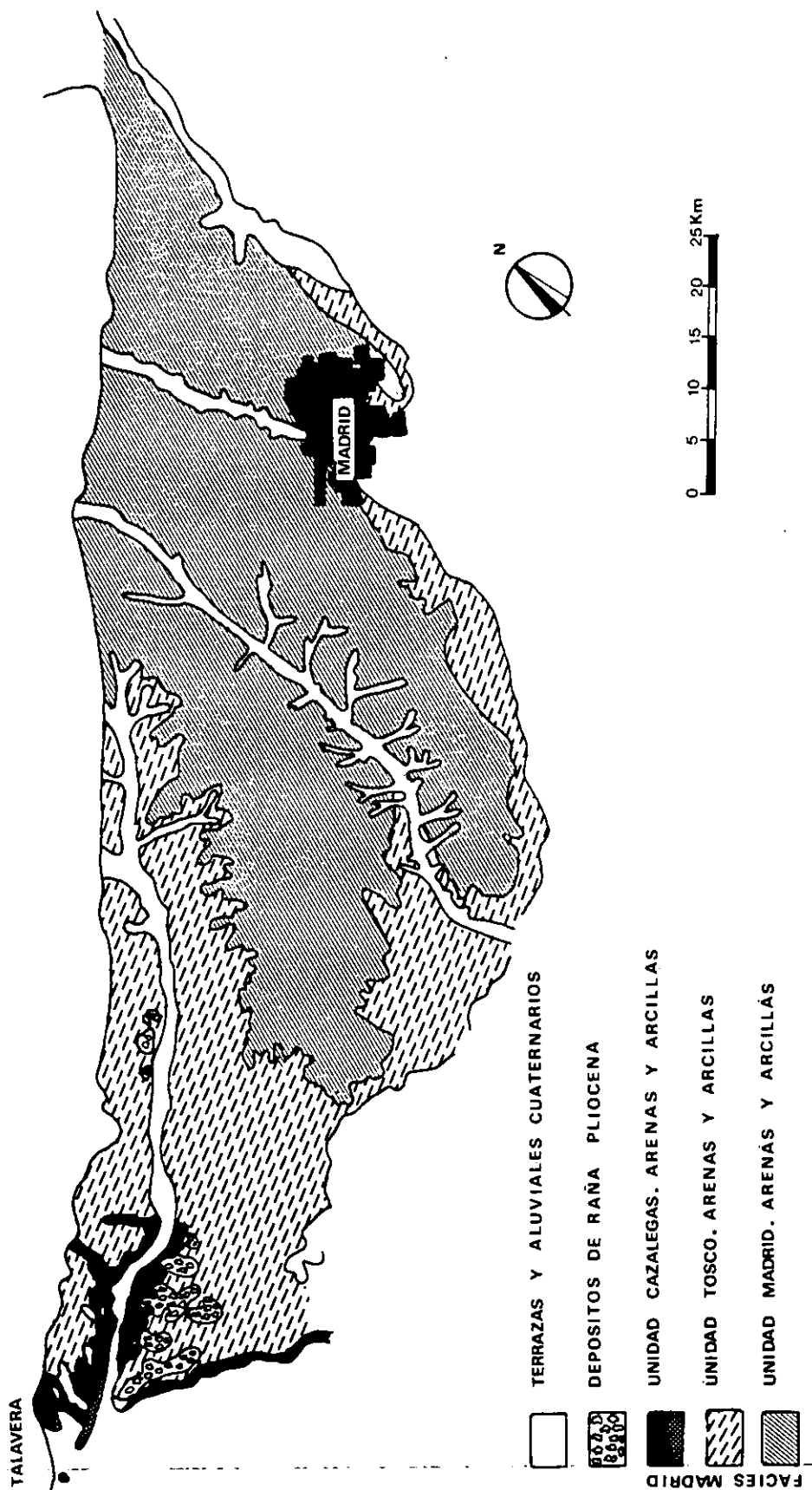







FIGURA 3.5. Materiales detríticos de la zona de estudio. Se trata fundamentalmente de depósitos terciarios (arenas y arcillas) de la facies Madrid y aluviales cuaternarios.



TABLA 3.1. Características litológicas e hidrogeológicas de las unidades litoestratigráficas del área de estudio.

UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS REFERENCIADAS EN LA FIGURA 3.5.						
		* UNIDAD MADRID (d)(e) * UNIDAD NAVALCARNERO (c) * FORMACION MADRID (a) * SUBFACIES D2 (b)	* UNIDAD TOSCO (c)(d)(e) * FORMACION TOSCO (a) * SUBFACIES D1 (b)	* UNIDAD CAZALEGAS (c)(e)	* DEPOSITOS ALUVIALES ACTUALES (c)(e) * RAMAS(d)	* TERRAZAS CUATERNARIAS (a)(b)(c)(d)(e)
		* Arcosas feldespáticas de tonos amarillentos (e) * Arcosas de tonos claros característico aspecto arenoso. En esta unidad aparecen entroncamientos calcareos en los alrededores de Navalcarnero y Quijorna (c) * Más arenosa (b)	* Arcillas, arcillas arenosas y arenas arcillosas de tonos ocres, más arcilloso que unidad Madrid (e) * Son más masivas y homogéneas que las unidades supra e infrayacentes. Los tramos con materiales más gruesos están regularmente distribuidos (c) * Más arcillosa (b)	* Fundamentalmente arcilloso aunque hay tramos más arenosos (e) * Comienza en superficie con un paquete de 20 m de espesor de materiales arcillosos. Después alternan tramos más arenosos. Después un espesor de 20-30m donde predominan de nuevo las granulometrías finas (c)	* La fracción gruesa está integrada principalmente por cantos de cuarcita y cuarzo engastada en una matriz de cuarzo, cuarcita, feldespato y minerales de arcilla de proporciones variables El espesor entre la desembocadura del Alberche y Talavera se calcula en 10 m (c)	* En el Alberche se distinguen terrazas altas, medias y bajas (c)
RELACION ARENA/ARCILLA		0.76 (d)	0.50 (d)	—	—	—
TRANS MI SI VI DAD (m2/día)	CUENCA R. GUADARRAMA	5-279 (e) Media=76	2-44 (e) Media=13	5-15 (e)	—	500 (**)
	CUENCA R. ALBERCHE	6-36 (e) 36 (c)	2-10 (c)(e)	5-15 (c)	100-200 (e)	1976 (c)
	CUENCA R. MANZANARES	17 (b)	5 (b)	—	—	500 (b)
	CUENCA R. JARAMA	17 (*)	5 (*)	—	—	500 (**)
PER MEA BI LI DAD (m/día)	CUENCA R. GUADARRAMA	2.5 (f)	0.6 (f)	—	—	—
	CUENCA R. ALBERCHE	—	—	—	—	—
	CUENCA R. MANZANARES	—	—	—	—	—
	CUENCA R. JARAMA	—	—	—	—	100-746 (a)
CAU DAL ES PE CI FI CO (l/s/m)	CUENCA R. GUADARRAMA	—	—	—	—	—
	CUENCA R. ALBERCHE	—	—	—	7-5 (c)	—
	CUENCA R. MANZANARES	0.05-2.4 (b)	0.02-0.8 (b)	—	—	—
	CUENCA R. JARAMA	1.38 (a)	0.89 (a)	—	—	2.3- 10.3(a)

Referencias bibliográficas  
(a) López Vera (1975)  
(b) Martínez Alfaro (1977)  
(c) Sastre (1978)  
(d) Fernández Uría (1984)  
(e) Rubio (1984)  
(f) Rebollo (1977)

(\*) Valor tomado de la cuenca del río Manzanares por ser la más próxima a la cuenca del río Jarama dentro del área de estudio.  
  
(\*\*) Valor tomado de la cuenca del río Manzanares por ser la más próxima a las cuencas de los ríos Guadarrama y Jarama dentro de la zona de estudio.

Los límites de la facies Madrid, tienen pues, marcadas diferencias litológicas: al Norte los materiales correspondientes al zócalo aflorante en el Sistema Central constituido por granitos y granodioritas, predominando en la zona Este los materiales de tipo metamórfico (gneises, esquistos, pizarras) (Peinado Moreno, 1973) que forman un límite que es considerado hidrogeológicamente como impermeable. El contacto de estas rocas con la cobertera sedimentaria de la cuenca de Madrid se produce a través de una falla inversa (Vidal, 1942; Fuster & De Pedro, 1956; Martín Escorza & Hernandez Enrile, 1972).

En el Sur el ambiente árido predominante durante el Terciario provocó los depósitos evaporíticos que existen en la actualidad (IGME, 1971), cuyo contacto con los materiales arcósicos de la cuenca se produce mediante interdigitaciones en la zona que constituye una facies de transición con la facies evaporítica o química, propiamente dicha.

En general, en la facies arcósica suelen existir, en la vertical, lentejones y canales con cantos de granulometría muy variable dentro de una matriz limo-arcillosa (Villaroya Gil & Rebollo Ferreiro, 1976).

En el área de estudio es importante, además, destacar la existencia de formaciones geológicas más modernas. Por un lado, las rañas pliocenas en el SW (Martín Escorza & Hernandez Enrile, 1972; Martín Escorza, 1977). Se trata de afloramientos aislados, de poco espesor (1 a 3 m), constituidos por cantos poco rodados de cuarcita empastados en una matriz arcillosa

de típico color rojizo. Se cree que las condiciones ambientales en las que se formaron corresponden a esporádicas avenidas en clima semidesértico, propio de los últimos tiempos del Terciario.

Por otro lado, cabe señalar la existencia de terrazas y aluviales cuaternarios de los ríos que quedan limitadas a una estrecha franja a lo largo de los cauces más importantes (Martín Escorza & Hernández Enrile, 1972; Rubio, 1984). Litológicamente están formadas por gravas, arenas y conglomerados.

### **3.1.3. Características hidrogeológicas**

Desde un punto de vista hidrogeológico, el área que nos ocupa ha sido objeto de numerosos estudios, que se han incrementado de forma considerable en los últimos años. Así se demuestra en la recopilación de artículos, informes oficiales y monografías realizada por Fernández Uría & Llamas (1983), donde hacen notar que en los años setenta se han publicado más documentos sobre las aguas subterráneas de Madrid que en los cien años anteriores (144 frente a 66) (Llamas, 1986; Fernández Uría, 1984).

Del Prado (1864), presentó un primer modelo conceptual del funcionamiento hidráulico del acuífero de Madrid, basado en los modelos de la cuenca artesiana de París, y que se mantuvo con muy pocas modificaciones hasta 1974 (Fernández Uría, 1984). Fueron Llamas & López Vera (1975) los que adoptando los modelos de Hubbert (1940) y Toth (1963) establecieron un modelo

tridimensional de flujo subterráneo, a partir del cual explicarían la hidroquímica del acuífero de Madrid (Fernandez Uría et al., 1985) y que se acepta actualmente.

Según este modelo, la recarga se produce en los interfluvios (zonas de máximo potencial hidráulico) a partir del agua de lluvia y la descarga se produce en forma de manantiales o zonas de rezume situadas en las zonas más bajas o valles (zonas de potencial hidráulico menor). La potencia de los materiales del acuífero de Madrid y lo accidentado del relieve permiten la existencia de flujos a distintas escalas, como los descritos en Canadá por Toth (1972) (Figura 3.6):

- flujos locales: entre interfluvios y valles contiguos a ellos; se encuentran por toda la región.
- flujos intermedios: sería el caso de los que van desde el interfluvio Jarama-Manzanares al río Guadarrama.
- flujos regionales: desde el interfluvio Jarama-Manzanares a la cuenca baja del río Alberche.

Así pues, se suele admitir que en el acuífero de Madrid se pueden aplicar las ecuaciones generales del flujo subterráneo, siendo un sistema con las siguientes características:

- heterogéneo: compuesto por niveles arenosos discontinuos distribuidos en una matriz limo-arcillosa de menor permeabilidad.
- anisótropo: la permeabilidad y otros parámetros

hidráulicos varían tanto en la vertical como en la horizontal, a causa de su heterogeneidad en la distribución de los materiales, cambios de facies, etc. (López Camacho, 1977).

- de gran espesor y único: todas las unidades en que se subdivide (fundamentalmente en función de la granulometría) están interconectadas hidráulicamente.

- libre: su límite superior lo forma la superficie freática, sometida a presión atmosférica.

Se han realizado también para el acuífero de Madrid una serie de modelos de flujo en la vertical, cuyo análisis ha contribuido a mejorar los detalles del modelo general y a conocer los tiempos de permanencia de las aguas en el subsuelo. Estos estudios han jugado un papel fundamental en la interpretación de las variaciones químicas e isotópicas del agua subterránea (Fernandez Uría, 1984; Rubio, 1984; Herráez, 1983).

Gracias a estos estudios se ha podido comprobar, que también en el acuífero de Madrid se produce lo que Chevotarev en 1955 denominó "evolución geoquímica" del agua subterránea, estudiando numerosas cuencas sedimentarias de Australia.

La "mineralización global" del acuífero de Madrid aumenta desde valores mínimos en los grandes interfluvios, como los del Jarama-Manzanares y Guadarrama-Alberche hasta alcanzar máximos de salinización del agua subterránea en el borde meridional del acuífero y en su extremo suroeste (Figura 3.7a).

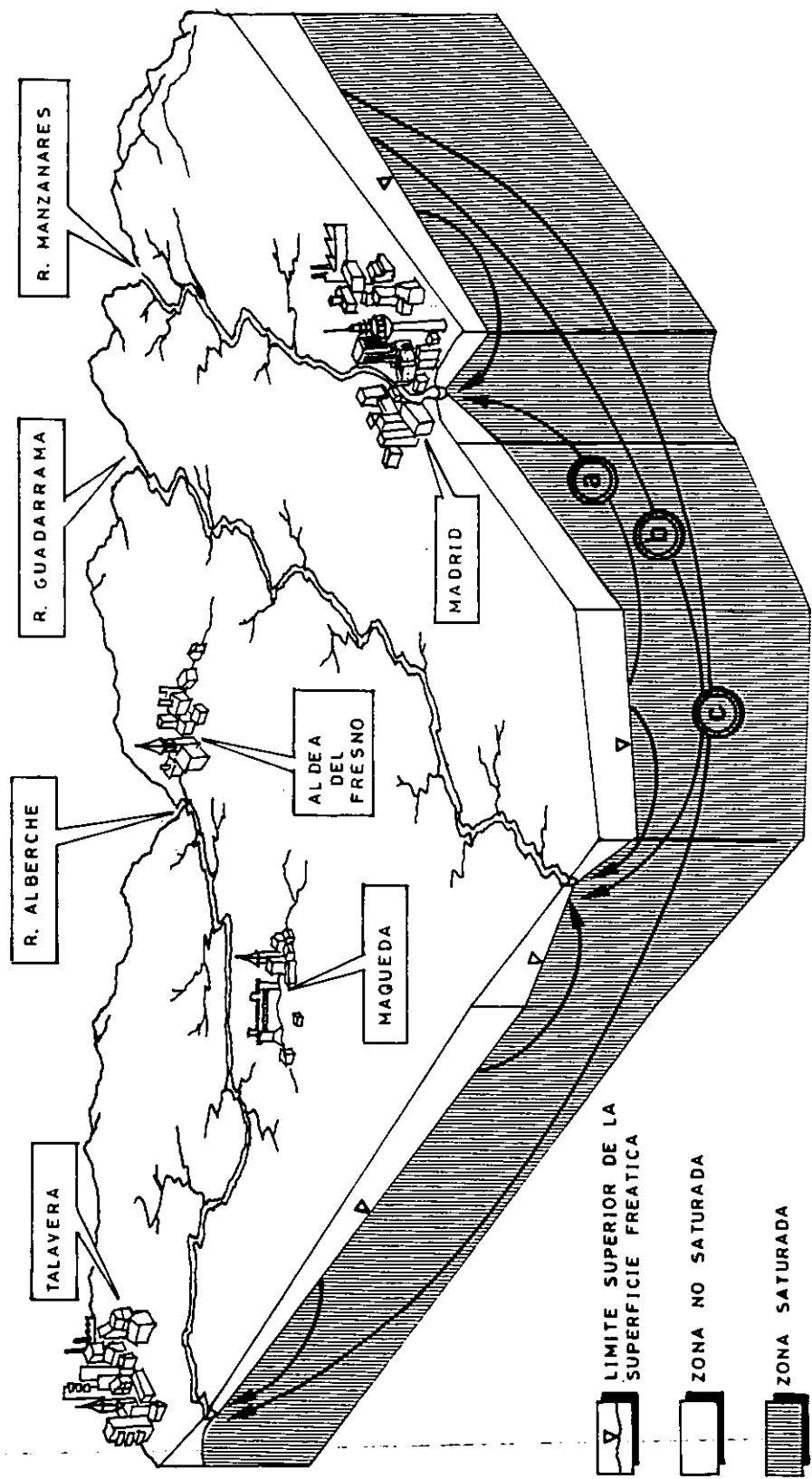
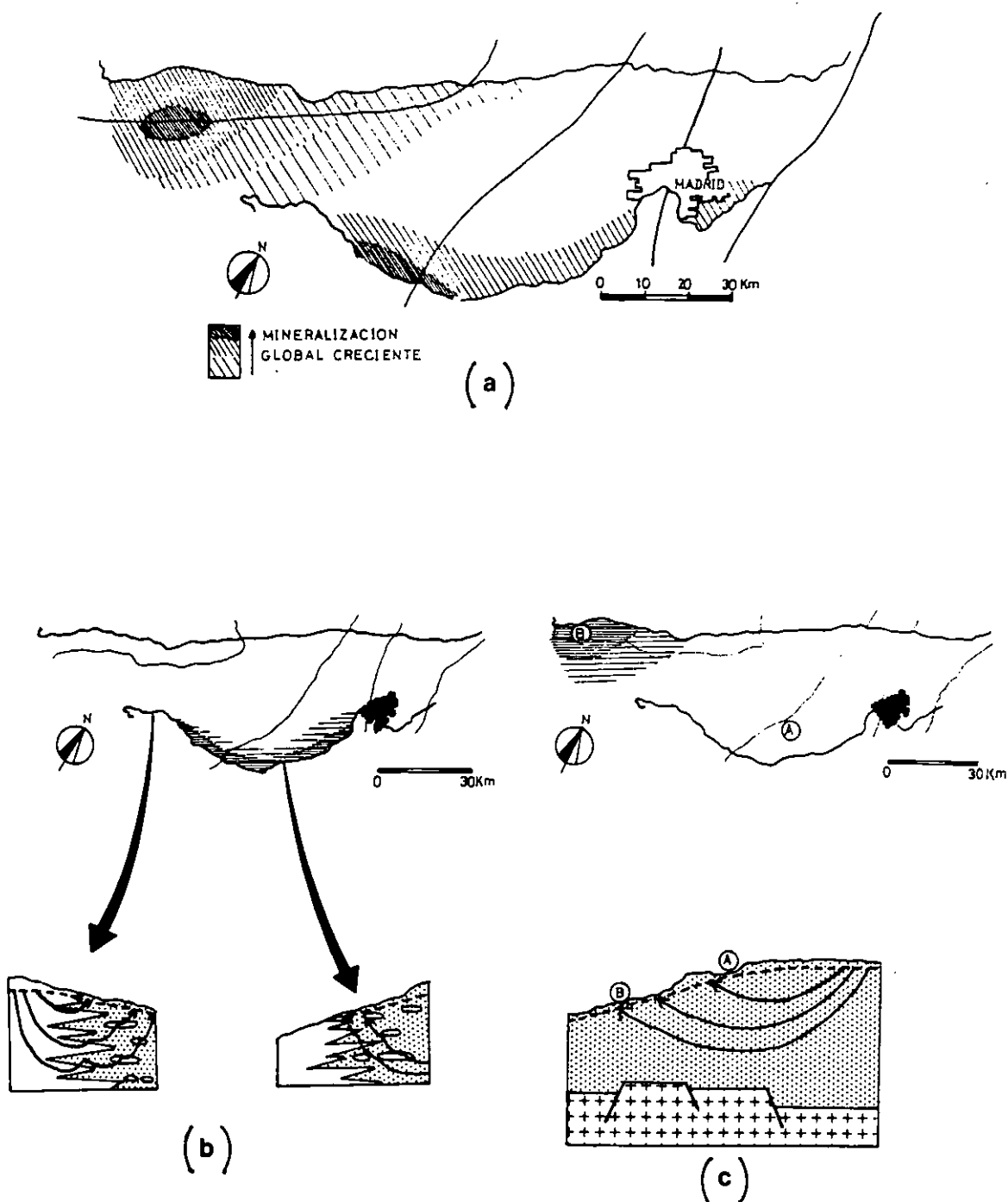


FIGURA 3.6. Modelo de distribución de flujos locales (a), intermedios (b) y regionales (c) en el acuífero de Madrid.



**FIGURA 3.7.** El grado de mineralización global del acuífero de Madrid (a) es causado tanto por la disolución de evaporitas (b) como por el proceso de evolución geoquímica del agua subterránea (c)

Numerosos estudios ponen en evidencia la existencia de dos procesos independientes de mineralización del agua subterránea para este acuífero (Rebollo, 1977; Sastre, 1978; Rubio; 1984; Herrera, 1987):

- Efecto litológico: se trata de una mineralización relativamente rápida por disolución de evaporitas. El agua al entrar en contacto con los lentejones de evaporitas en la franja que bordea al acuífero por el Sur (Figura 3.7b) cambia rápidamente su composición química, detectándose niveles relativamente altos de calcio, magnesio y sulfato.

- Evolución geoquímica del agua subterránea en flujos de largo recorrido, a través de materiales detríticos. Se distinguen en el acuífero de Madrid distintos grados de mineralización relacionados con las líneas de flujo. La mineralización aumenta en los fondos de los grandes valles, como es el caso del Guadarrama y el extremo del acuífero, al SW de Maqueda (Figura 3.7c). Este proceso se detecta por el carácter alcalino del agua.

Ambos fenómenos pueden ocurrir simultáneamente o bien mezclarse produciendo una mineralización de tipo mixto, como parece ocurrir en el área distal del acuífero (cercanías de Talavera de la Reina), con niveles altos de cloro y sodio disuelto en el agua subterránea.



### **3.2. SECTORIZACION AMBIENTAL. COMPONENTES SUPERFICIALES Y SUBTERRANEOS DEL MEDIO FISICO**

#### **3.2.1. Introducción**

En los últimos años se ha desarrollado un creciente interés por los estudios ecológicos regionales de tipo sintético, y la delimitación de regiones ecológicas o ecorregiones ha sido una herramienta de trabajo de gran utilidad. Se trata de confeccionar regiones geográficas homogéneas (Bailey, 1988) con igual significado ecológico (Vidal-Abarca, 1985), o lo que es lo mismo, considerar que la homogeneidad en el clima, geomorfología, suelos, vegetación, usos del suelo y otras características ambientales son suficientes para producir relativa homogeneidad en los ecosistemas (EPA, 1983).

La utilización de ecorregiones a la hora de abordar estudios ecológicos de carácter regional, tiene al menos tres importantes funciones:

- Para cualquier aspecto ecológico a estudiar, a partir de la sectorización ambiental de una región, se puede hacer un diseño claro de las áreas preferentes de muestreo de forma que se recoja la máxima variabilidad de la región objeto de estudio con el mínimo esfuerzo (cálculo de costes-beneficios en los programas de muestreo) (Bailey, 1984; MOPU, 1984).
- En principio, se puede esperar similares respuestas

en similares regiones (Bailey, 1983), es decir, que ríos, humedales, formaciones vegetales y en general, cualquier sistema de una misma ecorregión, tenderá a parecerse significativamente más entre sí que los de distintas ecorregiones.

- En planificación territorial, la necesidad de un conocimiento más profundo de los factores que condicionan la abundancia y persistencia de los recursos naturales de una región, ha llevado a la utilización de cartografías sintéticas que ayuden a estimar las potencialidades de los recursos naturales y la mejor forma de aprovecharlos (Llorca et al., 1988).

La confección de unidades con igual significado ecológico para regiones más o menos grandes se enfrenta, sin embargo, con un problema metodológico: es difícil la integración de los diferentes aspectos temáticos que conforman un territorio, ya que su expresión ecológica no constituye una mera superposición de los mismos, sino que las características ecológicas de un territorio quedan definidas por un gran número de parámetros ambientales que interactúan entre sí (González Bernáldez, 1982), y como afirma Bailey (1985), los procesos que se producen en un mesoecosistema, según la terminología de Rowe & Sheard (1981) o mosaico de paisajes, según Miller (1978), son más que la suma de los microecosistemas (Rowe & Sheard, 1981) o ecosistemas (Miller, 1978) que lo constituyen por separado.

En ecología terrestre es donde más se han desarrollado técnicas analíticas para descubrir relaciones entre factores ambientales, así como para

encontrar indicadores ecológicos que lleven a su posterior cartografía (ver Brunce et al., 1975; De Pablo & Pineda, 1985; De Pablo et al., 1987; Llorca et al., 1988) y que se aplican en último término, a programas de planificación territorial (Martín de Agar, 1984; Llorca et al., 1988), aunque en los comienzos se realizaron simples descripciones de áreas de gran extensión (Bailey, 1976).

En ecosistemas acuáticos fluviales, las unidades de estudio consideradas son las cuencas de drenaje, admitiendo que de ellas dependen el funcionamiento y dinámica de los ríos (Likens & Bormann, 1974; Hynes, 1975). Posteriormente muchos trabajos han confirmado esta idea (Larsen & Omernik, 1986; Whittier et al., 1988; Legendre & Legendre, 1984); sin embargo, hasta el momento, sólo se han hecho descripciones ecológicas de los lugares donde se producen los fenómenos dinámicos fluviales (Warren, 1979) sin atender a una verdadera integración de los aspectos indicadores que reflejen la mayor parte de la heterogeneidad de las cuencas.

Hugues & Omernik (1981) realizaron una sectorización para Estados Unidos, con referencia a características de las cuencas de drenaje: formas de la superficie, precipitación, tipos de suelo, vegetación potencial y usos del suelo. Posteriormente numerosos trabajos de ecología acuática se dedicaron a corroborar estas ecorregiones, comprobando que la distribución de las comunidades biológicas (sobre todo, son mayoritarios los estudios ictiológicos) presentaba unos patrones concordantes con la sectorización ecológica realizada (Larsen & Omernik, 1986; Rohm et al., 1987; Hughes et al., 1987; Whittier et al., 1988).

Trabajos realizados en la cuenca del río Segura (SE de España) han propuesto una metodología más completa que la mera superposición de mapas temáticos para conseguir una verdadera integración de aspectos del medio físico y humano a la dinámica fluvial (Vidal-Abarca et al., 1990).

El trazado de ecorregiones orientado al estudio de zonas palustres está poco desarrollado, encontrándose en la literatura muy pocos trabajos que aborden la integración de varias características indicadoras desde esta perspectiva.

Florín et al. (en prensa) diferencian varios sectores palustres en la región de la Mancha (España central) a partir de la litología, topografía, hidrología superficial e influencia de las aguas subterráneas.

González Bernáldez et al. (1987a) elaboraron un mapa ecológico a partir de datos hidrogeoquímicos de pozos existentes en el acuífero de Madrid, comprobando que los sectores definidos se ajustaban a la distribución de vegetación freatofítica del área.

Posteriormente, se completó esta sectorización introduciendo nuevas variables que podían condicionar la presencia de formaciones palustres en esta misma zona (González Bernaldez et al., 1989a).

La gran ventaja de trabajar en el acuífero de Madrid, radica en la existencia de un conocimiento profundo de sus sistemas de flujo subterráneo y sus características físicas, de forma que se han podido

cuantificar variables hidrogeológicas, fisiográficas y climáticas, que tras su tratamiento estadístico, mediante técnicas de análisis multivariante, han permitido trazar sectores ambientales con sentido limnológico en el área de estudio.

### **3.2.2. Metodología. Cuantificación de variables**

La forma general de delimitar unidades ambientales, consiste en seleccionar características físicas clave de un territorio y cartografiarlas en mapas temáticos de la misma escala, que se superponen posteriormente para delimitar regiones homogéneas (Ramos Fernandez, 1979; Bailey, 1983; EPA, 1983; Llorca et al., 1988).

Sin embargo, este tipo de metodología presenta algunos problemas:

a) A la hora de su aplicación ya que en general, la cartografía ambiental a una escala de trabajo adecuada es escasa. Es por esto, que en numerosas ocasiones los mapas temáticos tienen que ser elaborados por los propios autores a partir de recopilaciones de datos dispersos. Con todo ello, los límites definitivos de los sectores ambientales suelen ser subjetivos y dependerán, en último término, del conocimiento ambiental del área que posea el investigador (Vidal-Abarca et al., 1990), entendiendo como límite el lugar donde las diferencias en las características físicas aparezcan más pronunciadas que en áreas adyacentes (Bailey, 1983). Estos errores debidos a la

subjetividad, se pueden minimizar a medida que se utilizan escalas más detalladas (Bailey, 1983).

b) A la hora de su interpretación, ya que únicamente mediante la superposición de mapas, no se consigue una auténtica integración de las características ecológicas de un territorio, al tratarse de una mera yuxtaposición de datos, donde no se conocerán las interacciones entre los diferentes elementos del territorio (Llorca et al., 1988).

Mediante la aplicación de técnicas estadísticas multivariantes quedan solventados, en parte, estos problemas, ya que con estos procedimientos se recurre a una visión global de todos los aspectos, sin considerar temas individualmente, quedando así mismo, reducida la subjetividad inherente a las superposiciones de mapas (Llorca & Ruiz, 1987).

Para el acuífero de Madrid, la sectorización ambiental se ha realizado en las cuatro fases sucesivas que se detallan a continuación (Figura 3.8):

#### **Fase A. Selección de variables indicadoras**

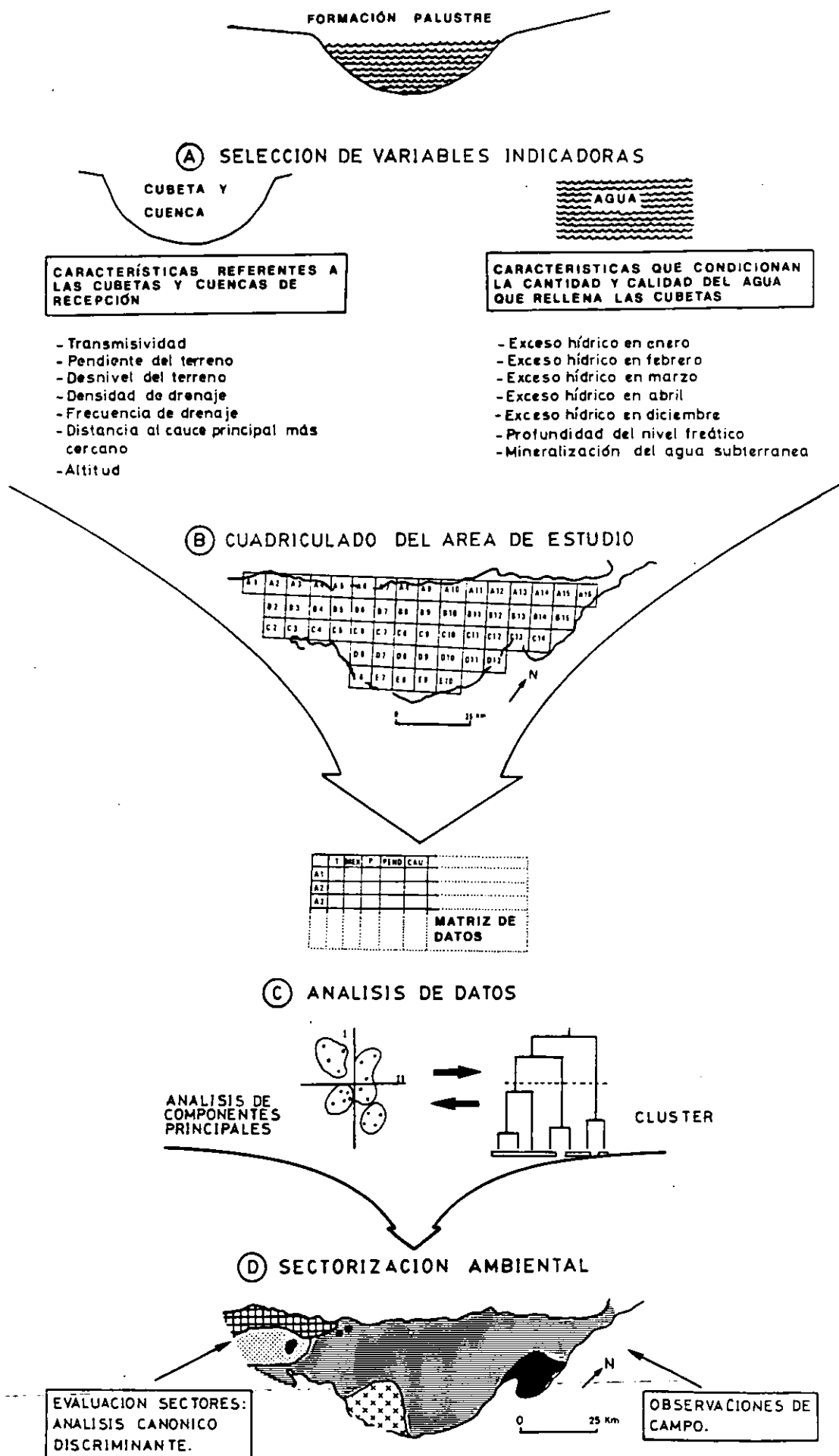
La presencia de una formación palustre se explica por la ocurrencia indispensable de dos grandes grupos de procesos: los que dan lugar a una cubeta capaz de contener agua y los responsables de la alimentación hídrica de la misma. Para el acuífero de Madrid, se ha realizado una recopilación de parámetros que recogen la variabilidad de ambos tipos de características (Tabla 3.2).

### 1). Características físicas referentes a las cubetas y cuencas de recepción

- Mediante la transmisividad ( $T$ ) expresada en  $m^2/día$ , el caudal específico ( $q$ ) ( $l/s/m$ ) y la permeabilidad o conductividad hidráulica ( $K$ ) medida en  $m/día$ , se puede describir hidráulicamente un terreno. Para el presente estudio, se han utilizado únicamente los datos de *transmisividad* ( $T$ ) por ser ésta la que dispone de un número de datos suficientes para caracterizar la zona de estudio (Tabla 3.1). Los valores de este parámetro hidráulico han sido tomados de López Vera, 1975; Martínez Alfaro, 1977; Sastre, 1978; Fernández Uría, 1984; Rubio, 1984.

Los valores de transmisividad se obtienen *in situ* mediante ensayos de bombeo (Villarroya Gil, 1977), y se relacionan con la permeabilidad ( $K$ ) mediante  $T = K \times b$  ( $b$  = espesor saturado, en un medio homogéneo e isótropo) (Custodio & Llamas, 1983).

- La potencia de la red de drenaje que circula por un territorio es uno de los condicionantes de la presencia de zonas encharcadizas (González Bernáldez, 1987). Así, las regiones endorreicas, donde el agua se acumula con mayor facilidad formando lagunas y charcas de diferentes tamaños, se caracterizan por su tabularidad, ausencia de cauces (discurriendo sinuosamente los pocos que circulan) y el fenómeno denominado "drenaje impedido", originado por flujos ascendentes de agua subterránea que saturan el sustrato, facilitando la acumulación de agua meteórica (González Bernáldez, 1987).



**FIGURA 3.8. Metodología empleada en el trazado de sectores ambientales en el acuífero de Madrid.**



TABLA 3.2. Características físicas del área de estudio empleadas en su sectorización ambiental.

NOMBRE DE LA VARIABLE		CODIGO	UNIDADES DE MEDIDA	CALCULOS
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS REFERENTES A LAS CUBETAS Y CUENCAS DE RECEPCION	TRANSMISIVIDAD	T	m <sup>2</sup> /día	Ensayos de bombeo (*)
	PENDIENTE	PEND	n° curvas de nivel/ cuadrícula	Recuento de número de curvas de nivel/cuadr.
	DESNIVEL	DESN	m	Diferencia entre máx y mín cota en cada cuadr.
	DENSIDAD DE DRENAJE	DD	km	Longitud total de los cauces/superf. cuadr.
	FRECUENCIA DE DRENAJE	FD	n° cauces/cuadrícula	N° cauces/superf. cuadr
CARACTERÍSTICAS QUE CONDICIONAN LA CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA QUE LLENA LAS CUBETAS	DISTANCIA AL CAUCE PRINCIPAL MAS CERCAÑO	DCAU	km	Distancia del centro de la cuadr. a cauce cercano
	ALTITUD	ALT	m	Altitud media
	PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREATICO	PROF	m	Altitud del pozo menos cota del nivel freatico
	CONDUCTIVIDAD DEL AGUA SUBTERRANEA	COND	µS/cm	Conductivímetro (*)
	EXCESO HIDRICO EN INVIERNO	Q1,Q2,Q3 Q4,Q12	mm	Balance hídrico (**)

(\*) Medidas directas.

(\*\*) Empleo del método de Thornthwaite.

En el acuífero de Madrid se midieron cinco variables indicativas del relieve y de la densidad de drenaje, factores que condicionan de forma importante la existencia de humedales (Custodio, 1987).

Sobre los mapas de la zona a escala 1:50.000 se procedió al recuento del número de curvas de nivel con cotas diferentes por unidad de superficie. El valor de esta variables denominada en este trabajo *PEND* indica la *pendiente* del terreno en cada área; así mismo, la diferencia entre la cota máxima y mínima se utilizó como indicativa del *desnivel (DESN)*; y la *densidad de drenaje (DD)*, la *frecuencia de drenaje (FD)*, considerando en ambos casos los arroyos y ríos permanentes del área de estudio y la *distancia de cada región al cauce principal más cercano (DCAU)* se han tomado como representativos de la potencia del drenaje en cada zona.

Otra medida fisiográfica utilizada fue la *altitud (ALT)*.

2). Características que condicionan la cantidad y calidad del agua que rellena las cubetas.

- Para estimar las entradas y salidas de agua superficial meteórica en los terrenos estudiados, se consideró la información aportada por las estaciones meteorológicas de la zona de estudio. Estas, se escogieron de las recopiladas por De Nicolás et al. (1979) para un período que abarca como máximo de información desde 1930 a 1973.

A partir de los resultados obtenidos de los balances hídricos teóricos calculados para cada estación meteorológica seleccionada (Figura 3.9), se consideraron cinco variables como indicativas del *exceso hídrico* que sólo se produce en los meses de invierno y primavera siendo el resto del año claramente deficitario. Se tomaron, por tanto los datos de Diciembre (Q12), Enero (Q1), Febrero (Q2), Marzo (Q3) y Abril (Q4) .

Los balances hídricos se realizaron bajo las siguientes condiciones:

Por un lado, los cálculos de evapotranspiración potencial se realizaron mediante el método de Thornthwaite (1948); Thornthwaite & Mather (1955) por su sencilla aplicación a partir de los datos que recogen las estaciones meteorológicas y de los parámetros tabulados (CEOTMA, 1984), a pesar de las limitaciones de dicho método, como se comentará posteriormente en este mismo trabajo.

La reserva máxima de agua del suelo se tomó como 100 mm, ya que es el valor más utilizado en los trabajos hidrogeológicos para la zona. Así, Sastre (1978) habla de esta cantidad estimada para el área del acuífero de Madrid, y Almarza (1984), en su ficha hídrica realizada para Talavera de la Reina, propone el valor de 100 mm entre otros dos posibles (50 y 150 mm).

- Para estimar la entrada y salida de agua subterránea, interesa delimitar áreas de recarga y descarga en el acuífero regional, tanto espacial como temporalmente,

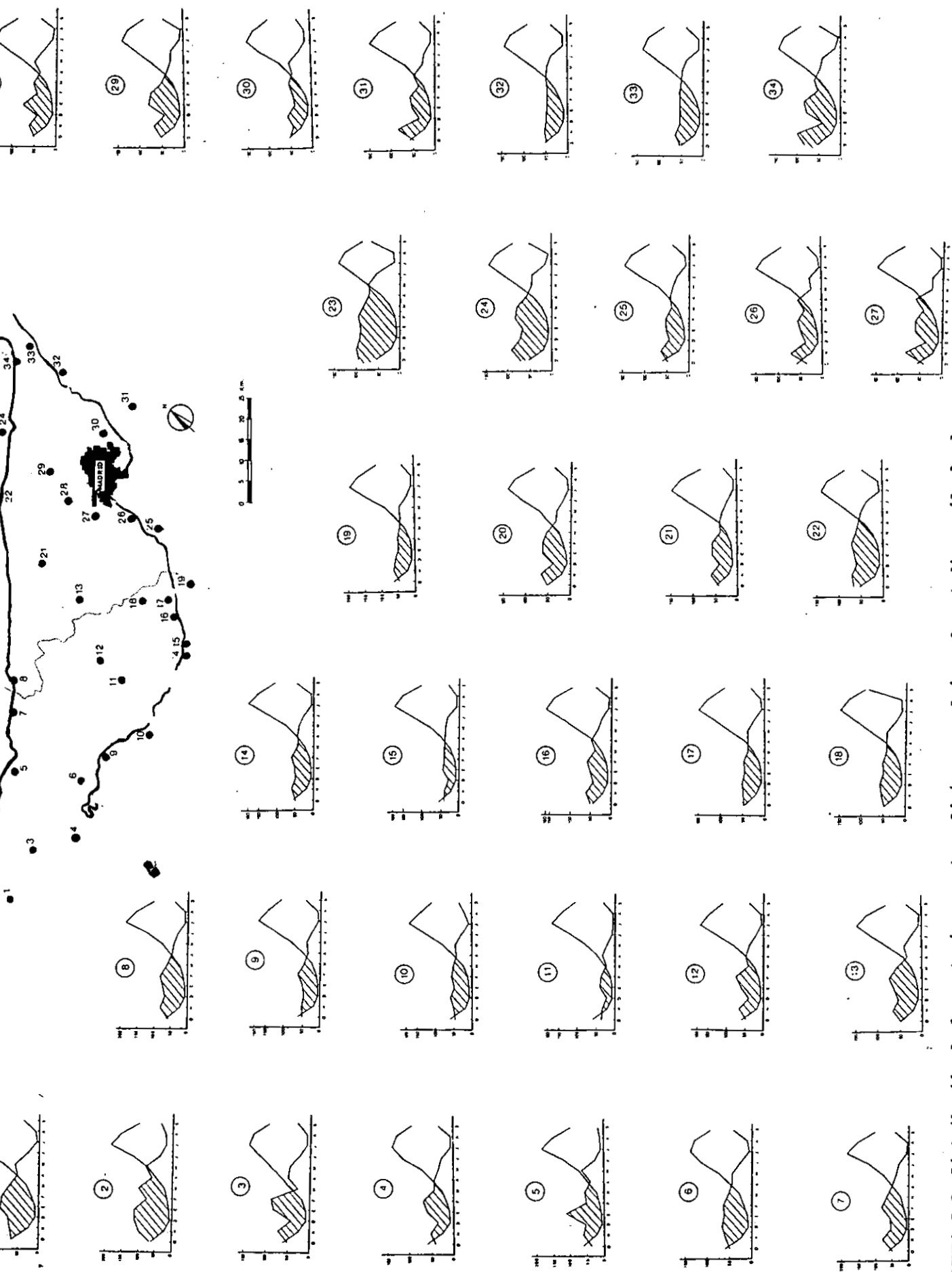


FIGURA 3.9.. Distribución de las estaciones meteorológicas en el área de estudio y cálculo de sus balances hídricos teóricos para un período máximo de 43 años.

ya que las fluctuaciones anuales del nivel freático, pueden provocar descargas puntuales en áreas en las que normalmente no se produce.

Sin embargo, este último aspecto no pudo ser incluido en nuestros análisis de forma cuantitativa, ya que los únicos registros piezométricos para un periodo de varios años que realiza el Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE) son muy irregulares, tanto en su distribución (Figura 3.10), como en su variación temporal. Sólo se pudo usar esta información cualitativamente, una vez que las regiones ecológicas estuvieron delimitadas, ya que a pesar de la escasez de datos, se observa una cierta tendencia del nivel freático a presentar mayor oscilación interanual en las regiones situadas al NE del acuífero de Madrid y al contrario en los instalados en las del S. Esto coincide con el fenómeno general de mayor oscilación del nivel piezométrico en las áreas de recarga que en las de descarga.

La diferenciación de áreas de recarga y descarga en el área de estudio, se realizó a partir de la información de 171 pozos recopilada de diversas fuentes (Martínez Alfaro, 1977; Rebollo, 1977; Sastre, 1978; Fernández Uría, 1984 y Rubio, 1984) (Apéndice 3.1) (Figura 3.10).

Se definió la variable *profundidad del nivel freático (PROF)* como la diferencia entre la altura topográfica del pozo y la cota del nivel piezométrico.

Para valores de la profundidad del nivel freático entre 0 y 5 m, se consideró que el pozo había sido instalado en áreas de descarga; así mismo valores de

PROF >5 m correspondían a zonas de recarga. Este límite se estableció en función de la máxima profundidad a la que pueden llegar las raíces de algunas plantas freatofíticas, indicadoras de áreas de descarga evapotranspirativa del acuífero o criptohumedales (Herrera, 1987).

- La concentración y composición iónica del agua que mantienen las cubetas dependen, sobre todo, de las características de los terrenos por los que circula el agua de escorrentía superficial y de la hidroquímica de las aguas subterráneas, si se trata de humedales influídos por dichos aportes hídricos.

Como ya se comentó, los materiales del área de estudio son fundamentalmente detríticos y el aporte de sales que estos depósitos aportan al agua de escorrentía es prácticamente nulo. Sin embargo, no ocurre así con el agua subterránea, que para el acuífero de Madrid posee características químicas diferentes según su situación geográfica dentro del sistema de flujo regional, debido a los fenómenos de evolución geoquímica y contacto con evaporitas referidos en el apartado 3.1.3.

De los 171 pozos considerados, se tomaron los valores de *conductividad (COND)* de sus aguas, como indicativo de su mineralización global.

#### Fase B. Cuadriculado del área de estudio.

Para recoger la máxima variabilidad de los parámetros descriptores seleccionados en el área de

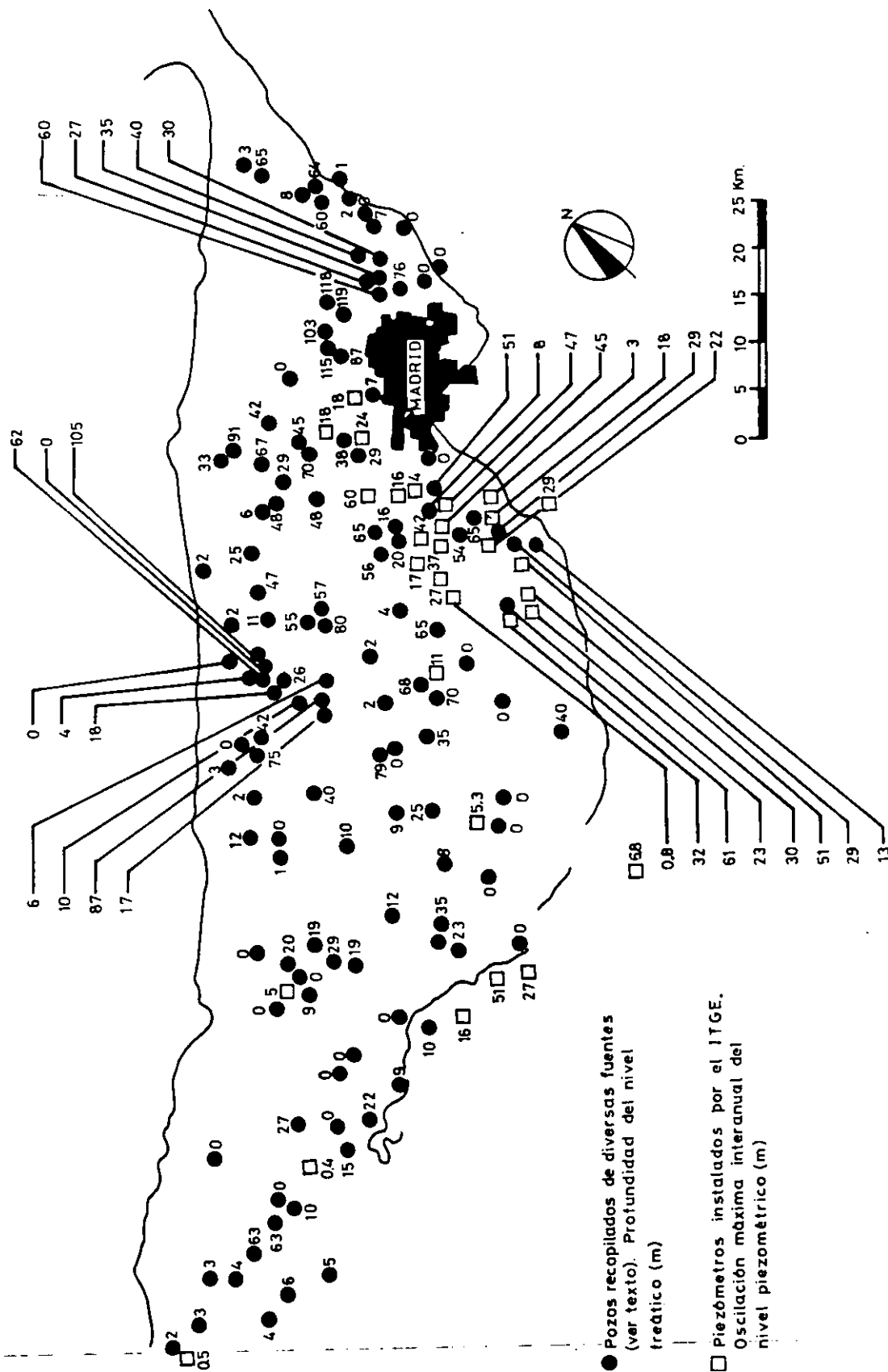


FIGURA 3.10. Distribución de piezómetros (ITGE) y pozos utilizados para la sectorización ecológica del acuífero de Madrid.

estudio, se subdividió ésta en parcelas de igual superficie, teniendo presente que el tamaño de cada una fuese coherente con la escala de los mapas utilizados y con el tiempo disponible para la realización del trabajo. Por ello se dividió la zona en 55 cuadrículas de 8 x 8 Kms, tomando como base mapas a escala 1:50.000. A cada cuadrícula se le adjudicó un único valor de los parámetros físicos seleccionados para el área, resultando una matriz de datos de 14 variables x 55 casos (Apéndice 3.2).

#### **Fase C. Análisis de datos.**

A la matriz obtenida se le aplicó, para su análisis las técnicas multivariantes de ordenación y clasificación propuestas por Llorca & Ruiz (1987).

Se realizó un Análisis factorial en Componentes Principales, con el programa P4M para identificar las variables físicas que contenían más información para su posterior uso como descriptores de los sectores ambientales y un Cluster con el programa P2M, ambos del paquete estadístico BMDP (Dixon & Brown, 1987). Posteriormente, se evaluó la sectorización obtenida mediante un Análisis Discriminante, efectuado con el programa P7M del mismo paquete estadístico, ya que resulta una excelente herramienta para comprobar la homogeneidad de los sectores ambientales (Bailey, 1984).

#### **Fase D. Sectorización ambiental.**

Los resultados obtenidos del Análisis de



Componentes Principales permitieron confeccionar un cierto número de mapas temáticos que integraban, cada uno, el significado estructural y funcional de diversos grupos de variables altamente correlacionadas entre sí.

La posterior aplicación de técnicas de clasificación jerárquica a estos resultados, permitió realizar un mapa provisional de unidades ambientales del acuífero de Madrid, que fue considerado como definitivo, una vez comprobada la homogeneidad de las regiones obtenidas mediante un Análisis Discriminante.

### **3.2.3. Delimitación de unidades ambientales**

En la Tabla 3.3 figuran los resultados del Análisis de Componentes Principales (ACP) efectuado con la matriz de datos, donde el primer eje o factor absorbe el 27% de la varianza total y queda definido por las variables que hacen referencia al exceso hídrico teórico calculado para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

Se distinguen, en los meses de exceso hídrico para este área (Diciembre a Abril), regiones más húmedas de otras con menos cantidad de agua.

El eje II, con una absorción de 16,15% de la variación total, se caracteriza por distinguir áreas de altitud más elevada, nivel freático profundo y agua subterránea poco mineralizada: regiones de recarga del acuífero, frente a otras más bajas donde el agua

**TABLA 3.3. Factores de carga rotados de los tres primeros ejes del Análisis de Componentes Principales realizado con las variables físicas consideradas para la sectorización ambiental del acuífero de Madrid**

	FACTOR I	FACTOR II	FACTOR III
Q3	0.907	0.000	0.000
Q1	0.824	-0.282	0.261
Q12	0.800	0.000	0.000
Q2	0.671	0.000	0.408
Q4	0.536	0.497	-0.349
ALT	-0.302	0.905	0.000
PROF	0.000	0.851	0.000
COND	0.000	-0.596	-0.463
FD	0.000	0.000	0.865
DD	0.270	0.000	0.766
Varianza explicada	27.00%	16.15%	15.36%

subterránea se encuentra más próxima a la superficie del terreno y es más salina, correspondiendo a áreas de descarga del acuífero.

El componente III (15,36% de la varianza absorbida) es definido por la frecuencia y densidad de drenaje, quedando así separadas regiones con poca pendiente y deficientemente drenadas de otras con pendientes más pronunciadas y con una red de drenaje más potente.

Los tres ejes obtenidos engloban tanto proceso superficiales o epigénicos (ejes I y III) como subterráneos o hipogénicos (eje II), según la terminología de Huguet del Villar (1950).

En la Figura 3.11 se representa la distribución de cuadrículas a intervalos regulares, según los planos definidos por los tres primeros componentes del análisis.

Mediante el Análisis de Clasificación Jerárquica (Cluster) realizado sobre las coordenadas que definen los tres primeros ejes del ACP, se agruparon las cuadrículas en que se dividió el acuífero de Madrid. El cartografiado de dichos grupos permite la identificación de unidades ambientales en una primera aproximación a la sectorización del área (Figura 3.12).

Para evaluar la homogeneidad intrínseca de cada sector, así como para contrastar las diferencias entre dichos sectores, se realizó un Análisis Discriminante, que demostró que la fiabilidad de la sectorización previa era del 92,7% . Los grupos de cuadrículas homogéneos en función de las dos primeras variables canónicas, quedan representadas en la Figura 3.13.

Sin embargo, un conocimiento profundo y detallado de la región, obliga a diferenciar, desde una perspectiva limnológica, el área correspondiente a los afloramientos de raña del SW, que, aunque inmersa en la zona correspondiente a la descarga intermedia del acuífero, tiene características limnológicas funcionales bien diferenciadas. En efecto, el mapa ambiental obtenido es resultado de una información precisa, pero muy general, de diferentes aspectos del acuífero. Así, se recogen en ellos tendencias globales claras, pero se omiten pequeñas áreas (como es el caso de las rañas) cuya diferenciación, únicamente es posible realizando estudios a otra escala de trabajo, o mediante observaciones de campo que evidencien esas diferencias locales.

Por estas razones, se ha considerado conveniente añadir a la sectorización automática obtenida esta nueva ecorregión, con la que quedará reflejada la variabilidad del área a diferentes escalas (Figura 3.14).

Con todo ello, se han detectado cinco sectores ambientales en el acuífero de Madrid:

Sector 1 o sector de descarga regional. Se trata de un sector típicamente de descarga regional del acuífero que queda enmarcado por la confluencia de los ríos Tajo y Alberche en las cercanías de Talavera de la Reina. Se caracteriza por la presencia de agua subterránea muy mineralizada y donde la profundidad del nivel freático no supera los 5 m. El balance hídrico resulta altamente positivo en los meses de invierno.

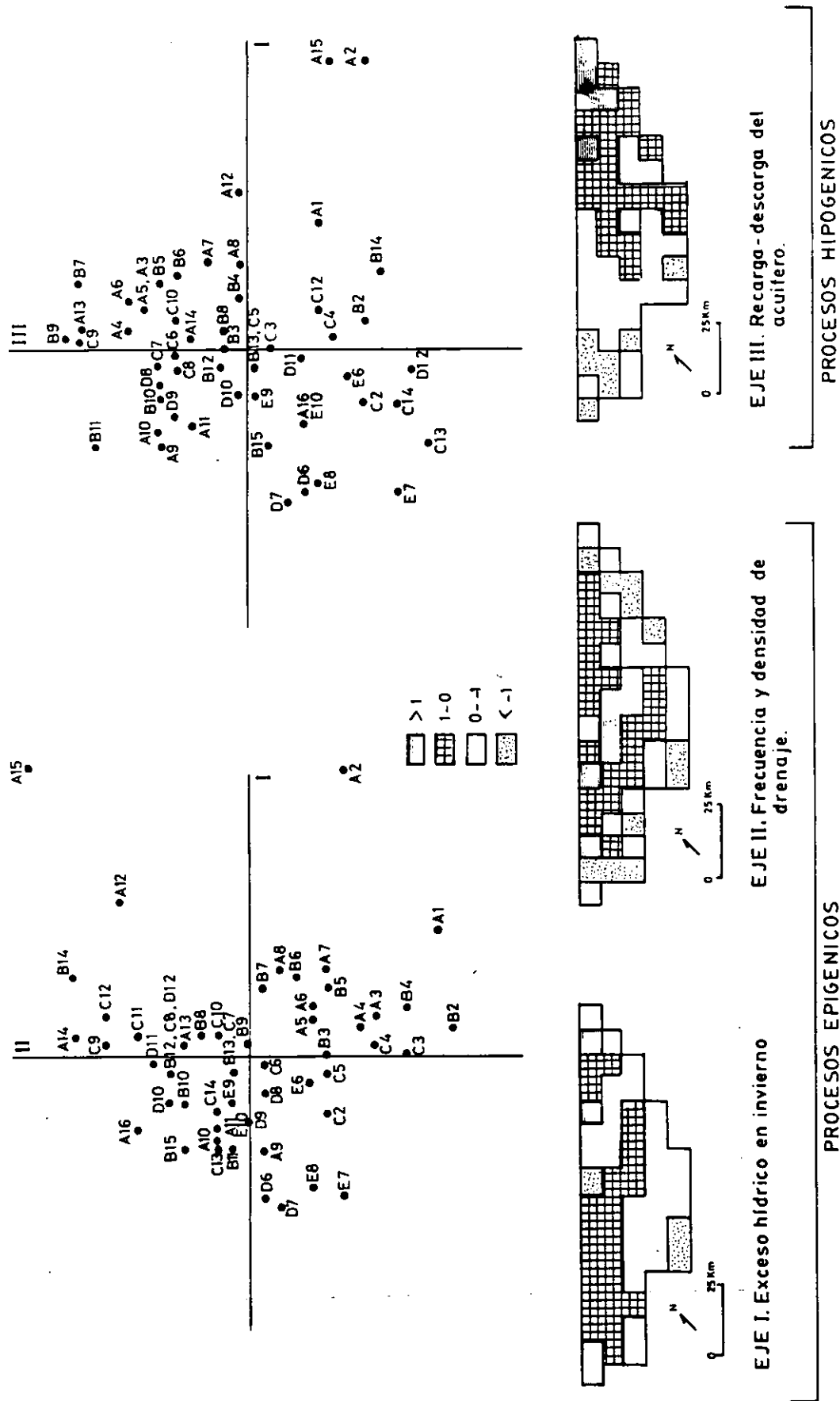
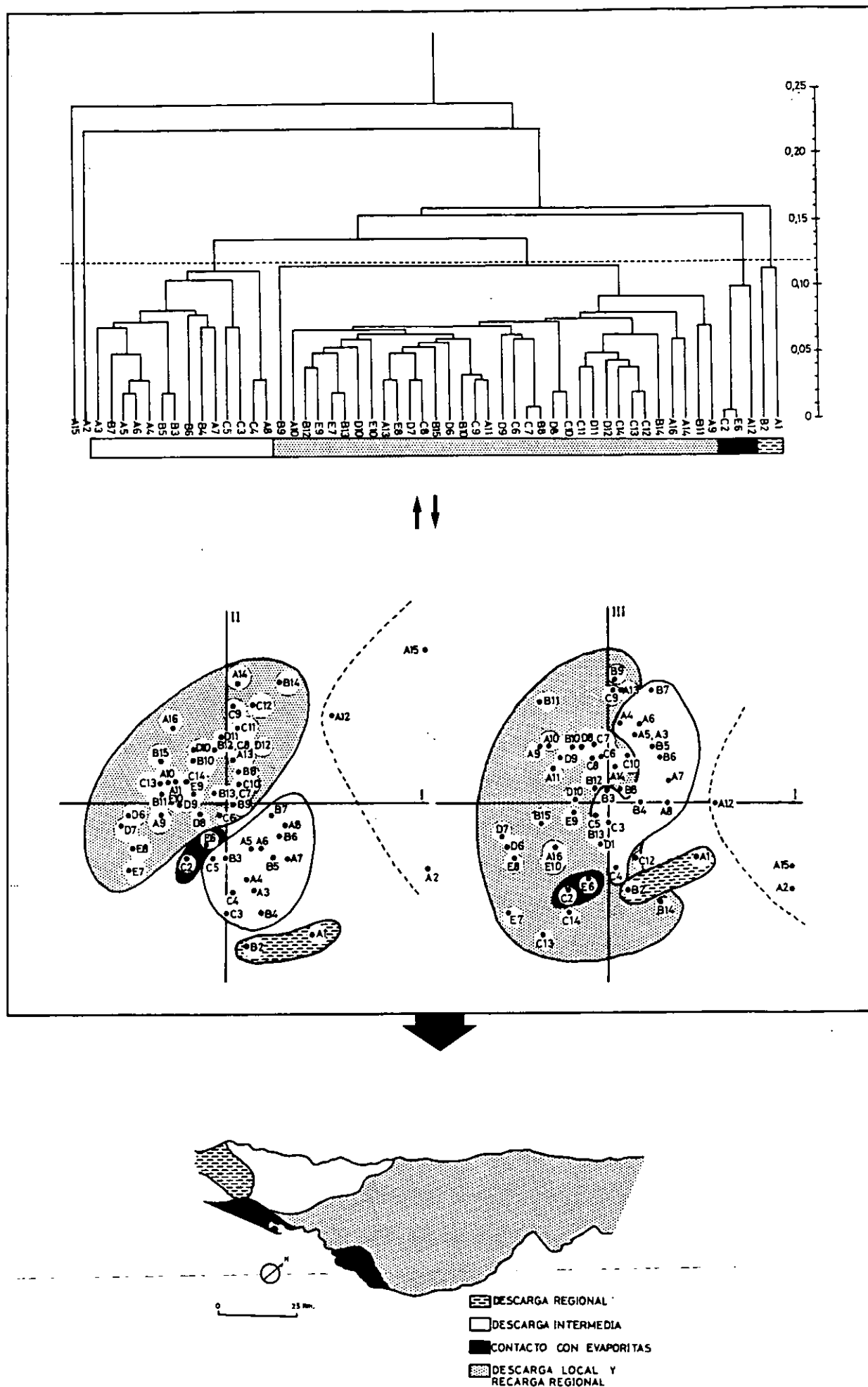


FIGURA 3.11. Proyección de cuadrículas en los planos definidos por los componentes principales I-II y I-III del ACP. Dichas cuadrículas se han agrupado en los mapas en función del valor que toman en cada eje.



**FIGURA 3.12. Sectorización ambiental del acuífero de Madrid obtenida mediante el Cluster realizado sobre el espacio definido por los 3 primeros ejes del ACP realizado sobre la matriz física original**

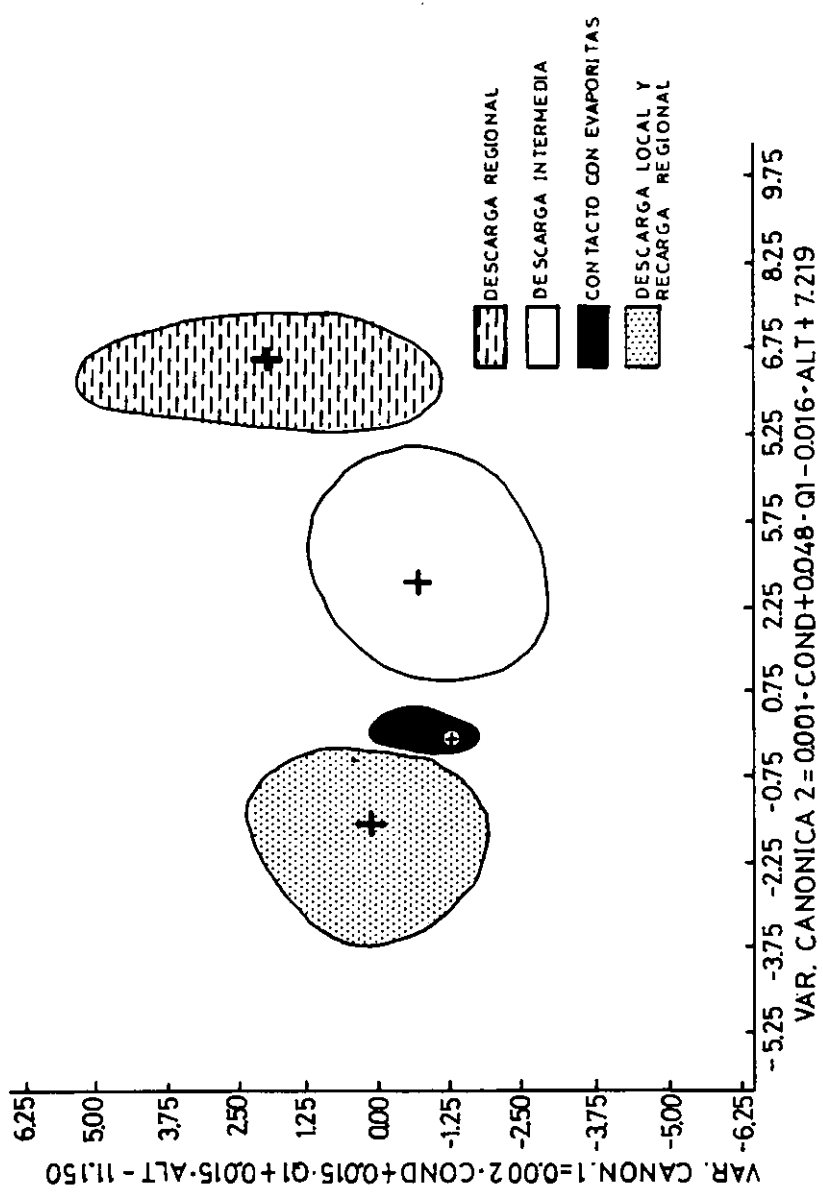
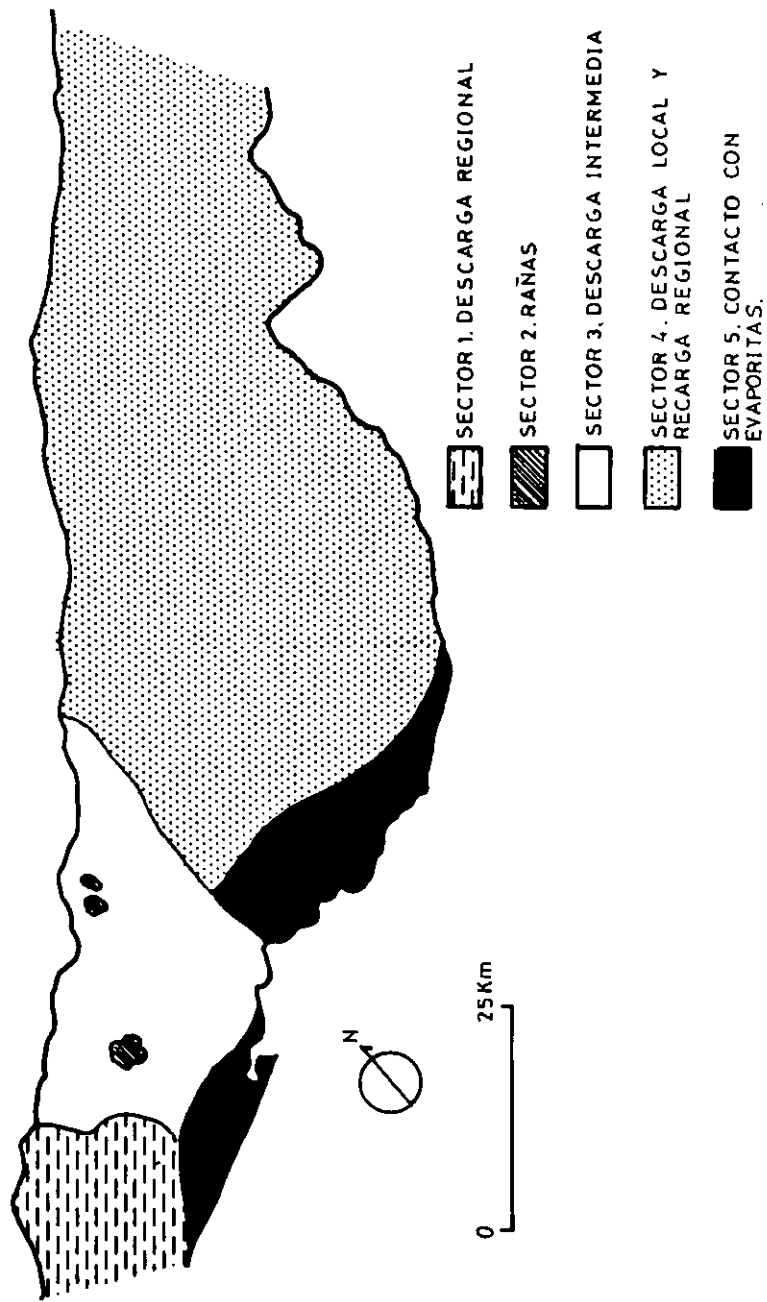


FIGURA 3.13. Grupos de cuadrículas en que se ha dividido el acuífero de Madrid en función de las dos primeras variables canónicas del Análisis Discriminante efectuado.



**FIGURA 3.14. Sectorización ambiental del acuífero de Madrid, obtenida mediante técnicas de análisis multivariante y observaciones de campo.**



Se trata de terrenos con escaso drenaje, constituidos por materiales permeables (aluviales cuaternarios y arenas), por lo que el agua de lluvia quedará menos tiempo retenida en superficie pero también facilitará la descarga de agua subterránea muy mineralizada, por tratarse de flujos regionales los que convergen en este sector.

Sector 2 o sector de rañas. Se trata de los afloramientos de raña pliocena existente en el extremo SW del área de estudio.

El tipo de materiales que lo constituye se caracteriza por la existencia en profundidad de niveles más arcillosos y por consiguiente, más impermeables, que permiten la existencia de acuíferos colgados, independientes del acuífero regional. Estos mismos materiales, facilitan la retención del agua de lluvia, a la vez que impiden la descarga de agua subterránea en superficie.

Sector 3 o sector de descarga intermedia. Este sector presenta rasgos similares a los del sector 1, produciéndose en él descarga de agua subterránea, aunque los valores de conductividad son ligeramente menores, ya que los flujos que llegan son de longitud intermedia.

Al igual que el sector 1, se trata de un área poco drenada y de naturaleza arenosa.

Sector 4 o sector de descarga local y recarga regional.

Es el sector más extenso del acuífero de Madrid. Constituido fundamentalmente por la facies denominada Madrid, de carácter altamente arenoso.

Comprende tanto los interfluvios entre los grandes ríos que discurren por la zona, constituyendo la recarga del mismo, como los valles de los mismos ríos adyacentes a las áreas de recarga regional. Estas últimas áreas serán los puntos de descarga de flujos cortos según los modelos espaciales propuestos para este acuífero, aunque su incidencia en la sectorización que aquí se presenta es mínima por tratarse de fenómenos muy puntuales indistinguibles de la áreas de recarga para la escala de trabajo utilizada.

Su hidrología superficial queda caracterizada por un escaso superávit en los meses de invierno.

Tanto la región de descarga local, como la de recarga regional, son similares desde el punto de vista de las características químicas del agua subterránea. En ambos casos se trata de agua poco mineralizada, al presentar un tiempo bajo de residencia en el subsuelo.

Sector 5 o sector de contacto con evaporitas. Se trata de una pequeña área situada al SW, escasamente drenada y con un exceso hídrico bajo en los meses de invierno. La mineralización del agua subterránea es alta, debido presumiblemente a su contacto con los materiales evaporíticos que se extienden hacia el S. Sus características litológicas (arenas) junto a su escasa humedad superficial hacen que la aparición de encharcamientos sea altamente improbable en esta

región.

A partir de la presente sectorización se han evaluado las posibilidades de cada ecorregión para mantener formaciones palustres, así como sus características hidrológicas y mineralización de sus aguas (Tabla 3.4)

### **3.2.4. Discusión**

Mediante el análisis cuantitativo de algunas variables físicas que caracterizan procesos tanto superficiales como subterráneos, se ha podido diferenciar regiones que muestran una cierta homogeneidad en cuanto a la posibilidad de mantener formaciones palustres con un origen y funcionamiento similares.

El empleo de variables cuantificables ha hecho posible la identificación de grupos de parámetros portadores de información, que se han utilizado como indicadores de la variabilidad presente en el área estudiada a la vez que se han caracterizado las interrelaciones existentes entre ellas. La aplicación de técnicas de clasificación a estos parámetros ha facilitado la construcción de un mapa con significado limnológico, en el que los aspectos de hidrología superficial y subterránea juegan un papel fundamental para definir y caracterizar áreas donde la probabilidad de que aparezcan humedales sea elevada.

Mediante la utilización del Análisis Discriminante

se detectan pequeñas zonas que no se ajustan de forma clara a la clasificación cerca de los límites que se han trazado (zonas de transición de unas regiones a otras). Precisamente este hecho, confirma la existencia de subdivisiones más finas que no han sido detectadas con la escala de trabajo empleada (Bailey, 1984; Larsen & Omernik, 1986).

En definitiva, la metodología empleada minimiza la subjetividad que puede aparecer al trazar límites en el medio natural (Llorca & Ruiz, 1987).

Algunos de los parámetros utilizados en la delimitación de ecorregiones, incluso para áreas tan pequeñas como el acuífero de Madrid, coinciden con los encontrados para grandes extensiones de territorio, como es el caso de las ecorregiones trazadas para Estados Unidos por Hugues & Omernik (1981): variables de carácter climático y en nuestro caso, más concretamente, aquellas que hacen referencia a la hidrología superficial, son tenidas en consideración para el trazado de los sectores ecológicos.

El grado de permanencia del agua de los sistemas húmedos es una de las variables más características y una de las que posee mayor variabilidad (Alonso et al., 1986). La hidrología superficial y subterránea es, por tanto, uno de los aspectos más interesantes a destacar, puesto que definirá la cuantía del exceso hídrico en el terreno, intimamente relacionado con la permanencia del agua en las lagunas. Este último aspecto condicionará el desarrollo de comunidades adaptadas a largos períodos de sequía, incluso cuando ésta se presenta de forma impredecible (Wiggins et al., 1980).

**TABLA 3.4. Predicción de las características que presentarán los humedales de cada ecorregión.**

	SECTOR 1	SECTOR 2	SECTOR 3	SECTOR 4	SECTOR 5
POSIBILIDAD DE QUE APAREZCAN ENCHARCAMIENTOS.	Alta	Alta	Alta	Baja-Media	Baja
ENTRADAS MAYORITARIAS DE AGUA	Subterr.	Superf.	Subterr.	Superf-Subt	Superf
PERMANENCIA DEL AGUA	Media-alta	Media	Media-alta	Baja	Baja
HIDROQUIMICA	Mineralización alta	Dulce	Mineralización media	Dulce	Mineralizac. media

En algunas zonas, la hidrología e hidroquímica subterránea puede alterar, de forma importante, la temporalidad y quimismo de las lagunas presentes, por lo que para zonas eminentemente de descarga, las formaciones palustres mantendrán un periodo hídrico más prolongado que en regiones de recarga con un régimen climático similar, así como unas características químicas similares a las del agua subterránea.

La geomorfología de los territorios del acuífero, también resulta ser una variable significativa para esta región. A pesar de la relativa homogeneidad del relieve regional, se pueden distinguir áreas más deficientemente drenadas de otras con pendientes más acusadas. Esto es así por la gran eficacia de la red de drenaje en el área de estudio, de forma más o menos similar para todas las cuencas.

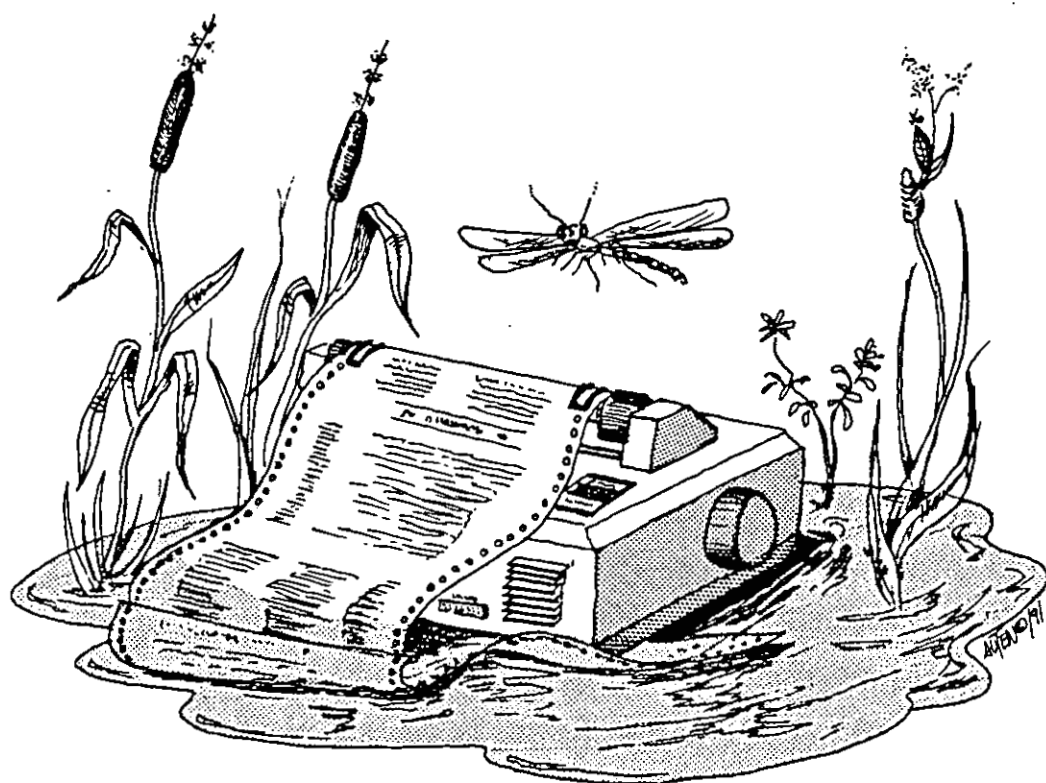
Las ventajas fundamentales del método que aquí se propone son claras a la hora de abordar estudios limnológicos de carácter regional. Por un lado, la utilización de sectorizaciones ambientales facilita la elección de áreas preferentes de muestreo (Bailey, 1984; MOPU, 1984) y por otra parte, permite la realización de inventarios y clasificaciones ecológicas de humedales desde una perspectiva genético-funcional que contribuyen en último término al desarrollo y gestión racional de estos sistemas (González Bernáldez, 1988).

En este sentido, la realización de dichas clasificaciones atendiendo sobre todo a los factores del medio físico referentes a la hidrología superficial y subterránea, permitirá elaborar planes de minimización de los impactos producidos por la

explotación de aguas subterráneas.

Se ha comprobado, así mismo, como la escala utilizada en este tipo de trabajos regionales es fundamental para diferenciar regiones ecológicamente homogéneas.

El aumento de esta escala, consigue generalmente un ajuste mayor de los sectores (Bailey, 1985), y en los casos en que la cartografía ambiental no tiene una escala de detalle suficiente para los objetivos del trabajo, las observaciones de campo resultan un complemento imprescindible, como queda claramente demostrado en el acuífero de Madrid, donde el sector de rañas se detecta con este tipo de metodología.



**4. INVENTARIO DE FORMACIONES  
PALUSTRES SITUADAS SOBRE  
EL ACUIFERO DE MADRID.**



#### **4.1. INTRODUCCION**

El inventario de las formaciones palustres de una región, así como su clasificación, son un paso previo imprescindible para el estudio de su funcionamiento y para el planteamiento de su gestión (DGOH, 1990).

Es por tanto, necesaria la realización de catálogos exhaustivos que faciliten la elaboración de tipologías completas que reflejen la variabilidad de humedales en función de los procesos que tienen lugar en las masas de agua de un territorio.

Antes de comenzar cualquier inventario, es imprescindible poseer una definición concreta de los sistemas limnológicos sobre los que se va a trabajar (Montanari, 1988). Como ya se comentó en el apartado 2.1, en el presente estudio, aunque el término humedal considera a toda anomalía hídrica respecto al terreno circundante como un continuo, que va desde los humedecimientos de la zona de las raíces de la vegetación (criptohumedales) hasta la presencia en superficie de láminas de agua (formaciones palustres), se han considerado únicamente éstas últimas para el inventario que aquí se presenta.

En el acuífero de Madrid, las formaciones palustres son masas de agua de pequeño tamaño; sin embargo, son este tipo de formaciones los representantes más característicos de las formaciones palustres de España, país pobre en lagos pero bien representado por aguas marginales. (Alonso & Comelles, 1984).

El interés de estos enclaves es extraordinario, ya

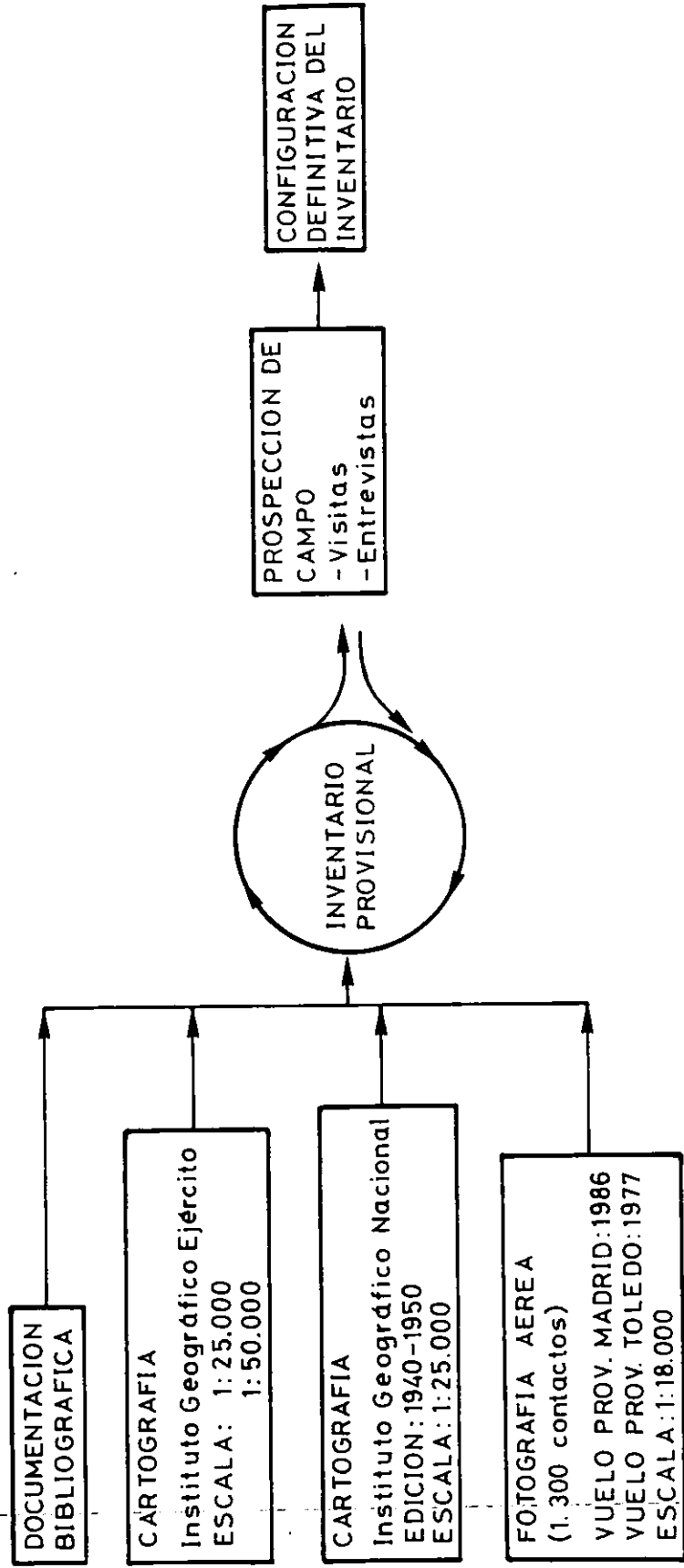
que se trata , como se comentó antes, de sistemas muy fluctuantes (Alonso et al., 1986) y dinámicos, que imponen a las especies adaptaciones muy particulares (Alonso, 1987).

#### **4.2. METODOLOGIA**

Para la preparación del catálogo de las formaciones palustres del acuífero de Madrid, se han utilizado varias fuentes, que han permitido la configuración final del inventario (Figura 4.1).

Se han incluido también las formaciones palustres desaparecidas por dos motivos fundamentales:

- Por un lado, el conocimiento de todas las charcas y lagunas (desaparecidas o no), es necesario para los estudios de carácter regional, ya que la densidad palustre es un parámetro importante a la hora de conocer la distribución de los humedales en cada región ecológica homogénea.
- Es interesante además, conocer tanto el grado de alteración que sufre cada zona, como sus causas. De esta forma, se pueden proponer medidas de protección de los sistemas que aún no han sido intervenidos o de recuperación de aquellos que se encuentren en un estado medio de degradación.



**FIGURA 4.1.** Metodología empleada para la realización del inventario exhaustivo de formaciones palustres situadas sobre el acuífero de Madrid.

La toponimia empleada en el inventario se refiere preferentemente a la mencionada en la cartografía empleada. Para un alto porcentaje de charcas que no aparecen en la cartografía y que no responden a ningún vocablo local, se ha empleado la toponimia de los terrenos colindantes.

**c) Interpretación de fotografías aéreas a escala 1:18.000**

Se revisaron los 1.300 contactos que forman el mosaico fotográfico del acuífero de Madrid para detectar todas aquellas charcas que no aparecían en la cartografía. Aproximadamente una charca de 0,04 ha era el tamaño mínimo que podía detectarse por este sistema.

**d) Prospección de campo extensiva**

A partir de los datos recopilados en los tres pasos anteriores se elaboró un inventario provisional que fue contrastado con una prospección de campo realizada en Enero de 1987. Este primer recorrido permitió conocer el estado de las formaciones palustres dudosas, así como incluir otras de pequeño tamaño que habían escapado a la revisión anterior. De esta forma recurrente, se llegó a la configuración definitiva del catálogo de lagunas y charcas del acuífero de Madrid.

El inventario realizado, aunque exhaustivo, no es definitivo, debido a las características intrínsecas de estos humedales: por un lado, el carácter altamente fluctuante de estos sistemas, hace que se pueda pasar por alto alguno de ellos, especialmente los más

#### a) Documentación bibliográfica

La escasez y pequeño tamaño de las formaciones palustres estudiadas, ha hecho que la mayoría hayan pasado desapercibidas en los estudios existentes sobre humedales españoles. En este sentido, ninguna de las charcas y lagunas del acuífero de Madrid son mencionadas en el Catálogo de los Humedales de España, realizado por Pardo en 1948, y sólo tres son inventariadas por la Dirección General de Obras Hidráulicas (DGHO) (1990) en su reciente inventario de los humedales españoles. En la provincia de Madrid, algunas de las charcas aparecen referenciadas en un catálogo realizado para esta comunidad autónoma (RENATUR, 1982), donde únicamente se recogen los resultados de un encuesta enviada a los ayuntamientos.

Tampoco las lagunas del acuífero detrítico de Madrid han sido objeto de estudios limnológicos específicos. Tan sólo para algunas de las charcas del zócalo cristalino, que pone límites por el Norte al acuífero, es posible encontrar trabajos ecológicos, florísticos y faunísticos (Margalef, 1949; García Valdecasas, 1981; Cobelas, 1982; Fernández Lop, 1983; García Valdecasas et al., 1984; Baltanás, 1985).

#### b) Revisión de cartografía antigua y actual

En la búsqueda de charcas y lagunas desaparecidas en el acuífero de Madrid, se revisaron de forma sistemática los mapas a escala 1:50.000 y 1:25.000 del Servicio Geográfico del Ejército y del Instituto Geográfico Nacional.

efímeros, difíciles de distinguir de los terrenos circundantes. Otro problema ya mencionado, es su pequeño tamaño, que resulta ser un grave condicionante a la hora de localizar estos sistemas en la zona.

En muchas ocasiones, no ha sido fácil aplicar el criterio de naturalidad ya que algunas cubetas han sido profundizadas, sobre todo en las proximidades de los ríos para la extracción de áridos o convertidas en balsas para el ganado.

#### ***4.3. RESULTADOS***

En la Tabla 4.1 se presenta el inventario de lagunas y charcas de la zona de estudio confeccionado según la metodología explicada.

Se dan algunas de sus características geográficas, administrativas y de conservación. Así mismo, se referencia el sector ambiental en el que se sitúa cada humedal. La numeración de las lagunas, coincide con la situación geográfica referenciada en el mapa de la Figura 4.2.

En total se han detectado 53 lagunas y charcas, pertenecientes a las comunidades autónomas de Castilla-La Mancha y Madrid. 31 de ellas situadas en la provincia de Toledo y 22 en la de Madrid.

El inventario que aquí se presenta, refleja el precario estado de conservación en que se encuentran estos sistemas: son 36 lagunas (63,15%) las

desaparecidas, afectadas por diversos factores de tensión. La mayoría de sus cubetas se han utilizado como receptáculos de residuos sólidos (escombros y basureros de asentamientos urbanos próximos) y en algunos casos, de residuos líquidos (aguas negras). Prueba del rápido ritmo de desaparición que sufren las lagunas del área es, que durante los ciclos hidrológicos muestreados (1987-1989), han desaparecido otras tres lagunas a causa de vertidos sólidos en sus cuencas: laguna Antigua y Balsa de los Llanos (N) en Madrid y laguna de Fuente del Valle en Toledo.

El sector ambiental más afectado por este vertiginoso ritmo de degradación es el que se encuentra en contacto con las evaporitas (nº 5) donde las tres lagunas inventariadas se hallan desaparecidas. El sector de recarga regional y descarga local (nº 4), con un 81% de sus lagunas desaparecidas (Figura 4.3) es el sector más extenso del acuífero de Madrid (2.301 Km<sup>2</sup>) y en gran parte se encuentra influido por el núcleo urbano-industrial de la ciudad de Madrid, lo que ha provocado un rápido deterioro de sus pocas áreas naturales.

Por el contrario, los sectores que mejor conservan su patrimonio palustre son los de descarga regional y rañas (nº 1 y 2), ya que ambos mantienen un 67% de las lagunas inventariadas (Figura 4.3)

#### ***4.4. DISCUSION***

Aunque la densidad palustre medida en has de superficie húmeda, resulta muy similar en todos los

**TABLA 4.1. Inventario de lagunas y charcas del acuífero de Madrid, indicando algunas de sus características geográficas, administrativas y de conservación. La numeración corresponde a la utilizada en la Figura 4.1.**

NOMBRE DE LA LAGUNA	Nº	COORDENADAS UTM	CUENCA HIDROGRAFICA	MUNICIPIO	PROVINCIA	ALTITUD (m)	SUPERFICIE (ha)	FACTORES DE TENSIÓN	SECTOR AMBIENTAL
Entrambosríos	1	30SUK4825	Tajo	Talavera de la Reina	Toledo	376	0.38	Desecada	1
Lag. de las Torres	2	30SUK4929	Alberche	Pepino	Toledo	380	0.20		1
Lag. Manantial de la Mata	3	30TUK5333	Alberche	San Román	Toledo	400	0.16		1
Charca Seca (a)	4	30TUK6334	Alberche	Los Cerralbos	Toledo	440	0.062	Desecada	2
Charca Seca (b)	5	30TUK6434	Alberche	Los Cerralbos	Toledo	440	0.01		2
Charca Seca (c)	6	30TUK6334	Alberche	Los Cerralbos	Toledo	440	0.062	Desecada	2
Los Baldíos	7	30TUK6533	Alberche	Los Cerralbos	Toledo	445	0.018		2
Retamalón	8	30TUK6532	Alberche	Los Cerralbos	Toledo	445	0.95		2
Lag. Delgada	9	30TUK6633	Alberche	El Casar de Escalona	Toledo	440	0.40		2
El Pocito	10	30SUK6126	Tajo	Lucillos	Toledo	460	0.65	Residuos líquidos	5
Ojo del Bravo	11	30TUK6830	Alberche	El Casar de Escalona	Toledo	460	0.0025		3
Lag. Fuente del Valle	12	30TUK7034	Alberche	El Casar de Escalona	Toledo	460	0.025	Residuos sólidos	3
Sanchibuey	13	30TUK7538	Alberche	Hornigos	Toledo	465	0.14		3
Tablas de Santa Olalla	14	30TUK7632	Alberche	Sta. Olalla	Toledo	470	0.23	Desecada	3
Ojos de Maqueda	15	30TUK8235	Alberche	Maqueda	Toledo	480	0.062	Desecada	3
Miragros	16	30TUK7948	Alberche	Escalona	Toledo	485	0.753	Urbanizac.	3
Juncos	17	30TUK8048	Alberche	Escalona	Toledo	480	0.49	Desecada	3
Llano de las Tablas	18	30TUK8252	Alberche	Almorox	Toledo	500	0.23	Desecada	3
Lag. de la Portera	19	30TUK8453	Alberche	Almorox	Toledo	510	0.312	Desecada	3
Navazarza	20	30TUK8753	Alberche	Sta. Cruz de Retamar	Toledo	475	0.0095		4
Grullera	21	30TUK9233	Tajo	Noves	Toledo	580	0.291	Desecada	5
Reguero de las Motonillas	22	30TUK9435	Tajo	Portillo de Toledo	Toledo	595	0.291	Residuos sólidos	5



**TABLA 4.1. Continuación**

NOMBRE DE LA LAGUNA	N°	COORDENADAS UTM	CUENCA HIDROGRAFICA	MUNICIPIO	PROVINCIA	ALTITUD (m)	SUPERFICIE (ha)	FACTORES DE TENSION	SECTOR AMBIENTAL
Puente Esquina	23	30TVK0043	Guadarrama	Ventas de Retamosa	Toledo	610	0.162	Desecada	4
Lag. de la Cañada	24	30TVK0345	Guadarrama	Ventas de Retamosa	Toledo	640	0.26	Desecada	4
Buenavista	25	30TVK0345	Guadarrama	Ventas de Retamosa	Toledo	640	0.25		4
Soto del A° Berciana	26	30TVK0060	Alberche	Escalona	Toledo	480	0.13	Sobreexpl. acuífero	3
Balsa de las Mercadas	27	30TVK0164	Perales	Villanueva	Madrid	590	0.12	Desecada	4
A° Aguajil	28	30TVK0662	Perales	Villanueva	Madrid	570	0.012		4
Lag. Grande	29	30TVK0950	Guadarrama	Casarrubios del Monte	Toledo	650	0.25	Desecada	4
Lag. Chica	30	30TVK1050	Guadarrama	Casarrubios del Monte	Toledo	640	0.026		4
Charca de Casarrubios	31	30TVK1250	Guadarrama	Casarrubios del Monte	Toledo	600	0.40	Desecada	4
Charca del Alamo	32	30TVK1554	Guadarrama	El Alamo	Madrid	610	0.28	Desecada	4
Balsa de los Pinos	33	30TVK1157	Guadarrama	Navalcarnero	Madrid	640	0.092	Desecada	4
Lag. Grande de Naval- puerto	34	30TVK3690	Manzanares	Sevilla la Nueva	Madrid	660	0.12	Desecada	4
Charca de Sevilla la Nueva	35	30TVK1266	Guadarrama	Brunete	Madrid	660	0.02	Residuos	4
Lag. de Villanueva de la Cañada	36	30TVK1478	Perales	Villanueva de la Cañada	Madrid	640	0.30	Residuos sólidos	4
Lag. Antigua	37	30TVK2549	Guadarrama	Cubas	Madrid	680	0.125	Residuos sólidos	4
Lag. de Cubas	38	30TVK2649	Guadarrama	Cubas	Madrid	540	0.01	Residuos sólidos	4
Cerro del Rayo	39	30TVK3053	Manzanares	Griñón	Madrid	655	0.25		4

TABLA 4.1. Continuación.

NOMBRE DE LA LAGUNA	Nº	COORDENADAS UTM	CUENCA HIDROGRÁFICA	MUNICIPIO	PROVINCIA	ALTITUD (m)	SUPERFICIE (ha)	FACTORES DE TENSION	SECTOR AMBIENTAL
Lag. de Sancha Barca	40	30TVK3254	Manzanares	Parla	Madrid	659	0.25	Desecada	4
La Horca	41	30TVK3455	Manzanares	Parla	Madrid	650	0.337	Residuos sólidos	4
Lag. de Humanes	42	30TVK2958	Manzanares	Puenlabrada	Madrid	690	0.282	Resecada	4
Lag. de Fregaderos	43	30TVK3060	Guadarrama	Puenlabrada	Madrid	680	0.312	Desecada	4
Balsa de Puenlabrada	44	30TVK3359	Manzanares	Puenlabrada	Madrid	660	0.125	Desecada	4
Balsa de los Llanos (S)	45	30TVK3461	Manzanares	Leganés	Madrid	680	3.0	Desecada	4
Balsa de los Llanos (N)	46	30TVK3462	Manzanares	Leganés	Madrid	685	0.20	Residuos sólidos	4
Lag. de Polvoranca	47	30TVK3263	Manzanares	Leganés	Madrid	670	0.25	Desecada	4
Lag. de José Herrera	48	30TVK3263	Manzanares	Leganés	Madrid	680	0.20		4
Lag. de Mari Pascuala	49	30TVK3163	Manzanares	Leganés	Madrid	680	5.43	Desecada	4
Balsilla de Leganés	50	30TVK3364	Manzanares	Leganés	Madrid	680	0.25	Residuos sólidos	4
Balsa de Alcorcón	51	30TVK3167	Manzanares	Alcorcón	Madrid	680	0.19	Desecada	4
Lag. de Navalcanero	52	30TVK1460	Guadarrama	Navalcanero	Madrid	650	0.25	Desecada	4
Lag. del Aguila	53	30TVK3790	Manzanares	Madrid	Madrid	520	0.28	Desecada	4

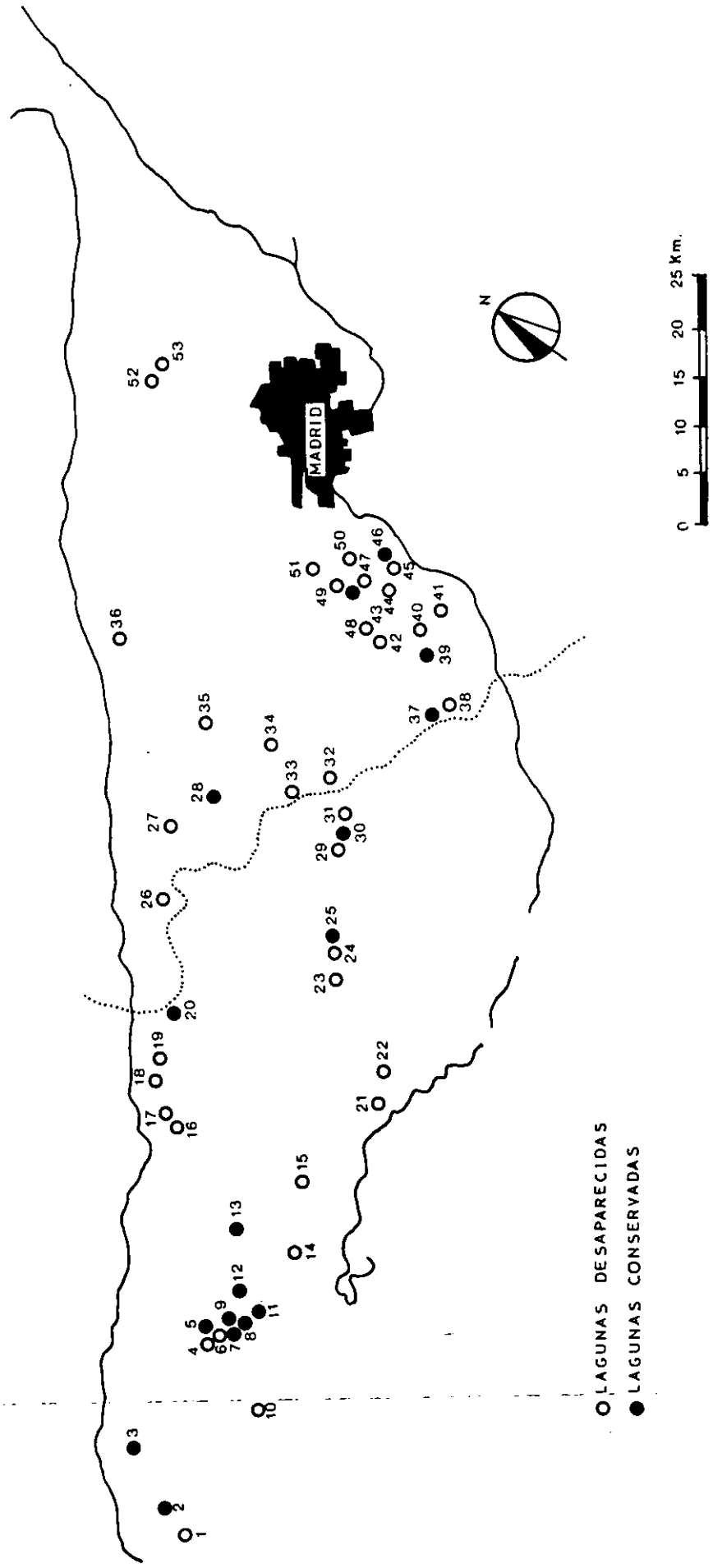


FIGURA 4.2. Situación geográfica y estado de conservación de las formaciones palustres del acuífero de Madrid. Su numeración corresponde con la utilizada en la Tabla 4.1.

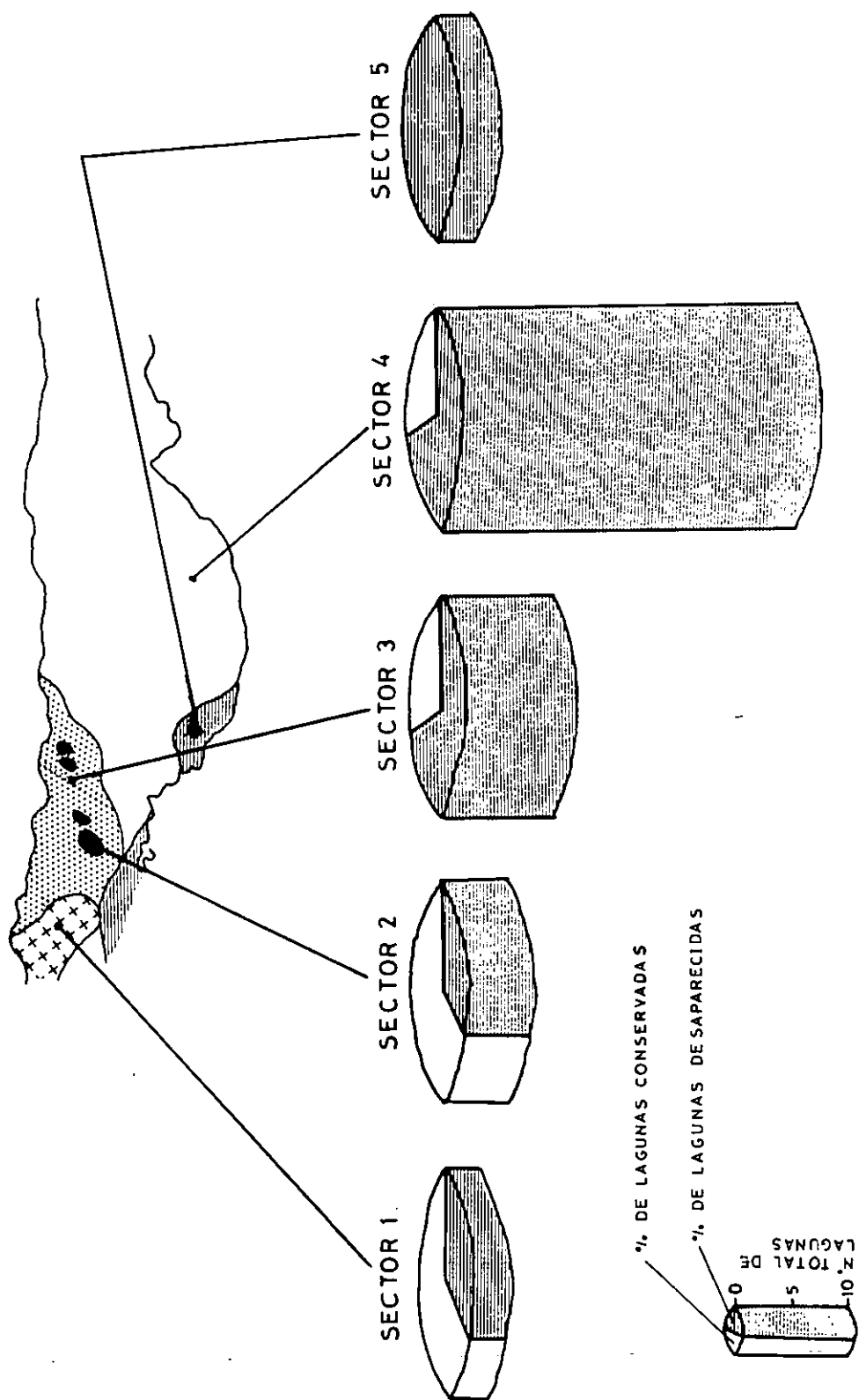


FIGURA 4.3. Densidad y estado de conservación de las formaciones palustres del acuífero de Madrid en cada uno de los sectores delimitados.

sectores ambientales del acuífero de Madrid (Tabla 4.2), no ocurre lo mismo con el número de formaciones palustres por km<sup>2</sup>. Tal y como se predecía en el capítulo 3 de este trabajo (Tabla 3.4) aparecen tres sectores (descarga regional e intermedia y rañas) con un mayor número de lagunas por superficie (0,015, 0,017 y 0,017 respectivamente), mientras que el sector 4 (recarga regional y descarga local), donde se predecía unas posibilidades media-baja de aparición de encharcamientos, presenta 0,013 lagunas/km<sup>2</sup>. El sector de contacto con evaporitas, con pocas posibilidades de mantener formaciones palustres, tiene efectivamente la menor densidad palustre del acuífero (0,010 lagunas/km<sup>2</sup>).

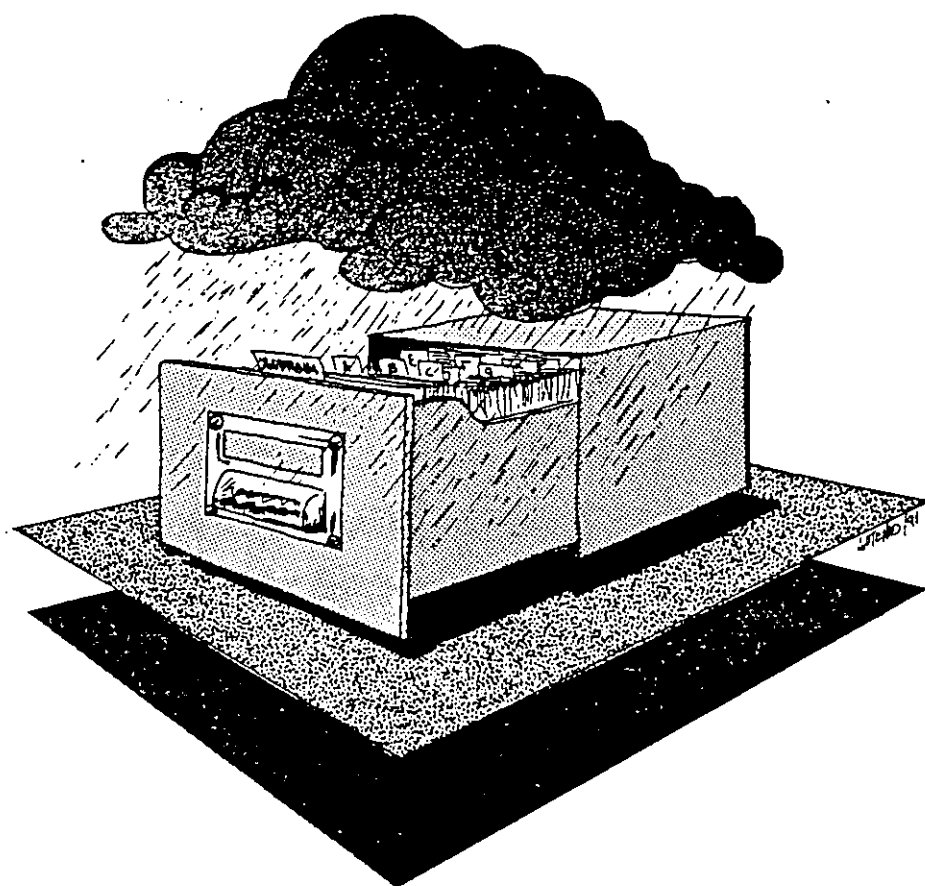
En cualquier caso, la densidad palustre por número o superficie húmeda, resulta insignificante en comparación con otras áreas palustres españolas: aproximadamente 20,48 ha de superficie húmeda para un territorio de 3.700 Km<sup>2</sup> (Tabla 4.2).

Esta pobreza en humedales de la zona de estudio ya se explicó, y se refiere a la potencia de la red de drenaje del río Tajo, bien alimentada hídricamente y que no permite que se formen paisajes tabulares donde se puedan concentrar grandes masas de agua (González Bernaldez et al., 1987b).

Este hecho, se hace bien patente en la gran abundancia de criptohumedales en el área, frente a la escasez de formaciones palustres (González Bernaldez et al., 1989a).

TABLA 4.2. Número de lagunas y superficie palustre en cada sector ambiental definido en el acuífero de Madrid. El cálculo de la densidad palustre se ha realizado conociendo la superficie en Km2 de cada sector.

		SECTOR 1		SECTOR 2		SECTOR 3		SECTOR 4		SECTOR 5		TOTAL
		Descarga Regional		Rañas		Descarga Intermedia		Des. local Recar. regional		Evaporitas		
		Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	
Nº TOTAL DE LAGUNAS		3.00	5.66	6.00	11.32	10.00	18.66	31	58.49	3.00	5.66	53.0
SUPERFICIE PALUSTRE (ha)		0.74	3.70	1.50	7.55	2.37	11.93	14.02	70.59	1.23	6.19	19.86
DENSIDAD	mº/Km2	0.015		0.017		0.017		0.013		0.010		
PALUSTRE	ha/Km2	0.0038		0.0043		0.0041		0.0060		0.0042		
SUPERFICIE DEL SECTOR (Km2)		190		345		576		2301		288		3700



**5. CLASIFICACION GENETICA Y  
FUNCIONAL DE FORMACIONES  
PALUSTRES.**

### **5.1. INTRODUCCION**

La clasificación de humedales en diversas categorías de acuerdo con sus características estructurales y funcionales, permite entre otras cosas, reducir la complejidad de los fenómenos naturales a un número limitado de conceptos importantes y útiles (Zimmerman et al., 1983), favorecer el estudio de su funcionamiento, ofrecer un campo abierto al estudio de indicadores ecológicos (Alonso, 1987) y contribuir a su desarrollo y gestión racional (González Bernáldez, 1988).

Este último punto es sin duda, la razón más común para clasificar humedales en la actualidad (Mitsch & Gosselink, 1986). En efecto, el desconocimiento del funcionamiento de la mayoría de estos sistemas, unido a la urgencia de su conservación, hacen que la más efectiva política de conservación consista en la utilización del criterio de representatividad (Usher, 1986) que pasa por una tipificación previa para su correcta aplicación (González Bernaldez, 1988).

Para Cowardin et al. (1979) las clasificaciones de humedales tienen al menos cuatro objetivos básicos:

- Descripción de unidades ecológicas homogéneas.
- Facilitar las tareas de gestión y conservación al poder aplicar un valor a cada humedal en función de diversos criterios.
- Inventario y cartografía de las unidades.
- Homogeneización de terminologías y conceptos.



Los humedales del acuífero de Madrid ya han sido objeto de clasificaciones previas a la que aquí se presenta. En el caso de la realizada por Sastre (1984), se tuvieron en cuenta condicionantes litológico-estructurales, geomórficos e hidroquímicos que condujeron a la elaboración de una tipología fisiográfica de criptohumedales no exenta de cierta confusión en la terminología empleada.

La clasificación realizada por González Bernaldez et al. (1988) utiliza criterios genético-funcionales aplicados tanto a criptohumedales como a formaciones palustres, y puede considerarse un claro antecedente a la elaborada en este capítulo.

Con ella se intenta cubrir un doble objetivo, por una parte la identificación de patrones espacio-temporales de distribución de aspectos del hábitat físico, características físico-químicas de las aguas y estructura de algunas comunidades acuáticas, en relación con el sistema hidrogeológico regional del acuífero de Madrid, permitirá la elaboración de una clasificación de formaciones palustres atendiendo fundamentalmente a los mecanismos que regulan su origen y funcionamiento.

Por otro lado, dicha clasificación será el punto de partida para evaluar la homogeneidad de los sectores ambientales propuesto en el capítulo 3. Esta comparación permitirá conocer, en último término, la capacidad de la metodología empleada en la sectorización para predecir diferentes tipos de humedales a partir de características del medio físico, tanto superficiales como subterráneas.

## **5.2. METODOLOGIA**

A traves de tres tipos de medidas independientes efectuadas en las formaciones palustres objeto de estudio,

- medidas morfológicas y fisiográficas.
- medidas físico-químicas del agua.
- determinación de organismos acuáticos.

se comprobó la validez y homogeneidad de los sectores ambientales delimitados para el área, lo que facilitó la elaboración de tres tipologías de humedales con cada uno de los criterios y auxiliado por análisis estadísticos. Todo ello confluyó finalmente en una clasificación de tipo genético-funcional (Figura 5.1).

La realización de cada uno de estos pasos, se detalla a continuación:

### **5.2.1. Medidas morfológicas y fisiográficas.**

En la Tabla 5.1 se resumen los parámetros elegidos para caracterizar morfo-fisiograficamente las lagunas del acuífero de Madrid, incluyendo las desaparecidas y alteradas por algún factor de tensión.

Las medidas de *altitud (ALT)*, *distancia mínima del cauce más próximo (DR)* y *distancia a la charca más cercana (DCH)* se tomaron de los mapas de escala 1:50.000 del Instituto Cartográfico del Ejército. La

*permanencia del agua (PERM)* fue tomada, a través de medidas directas en el campo.

Otras variables referentes a las formas de las cubetas, tales como, *superficie (SUP)*, *anchura máxima (ANCH)*, *longitud máxima (LONG)*, *perímetro (PERI)* y *profundidad potencial (PROF)* fueron obtenidas a partir de dos tipos de fuentes:

- Para las charcas y lagunas desaparecidas, los cálculos se hicieron a partir de la cartografía a escala 1:50.000 y la fotografía aérea a escala 1:18.000, ya que en la mayoría de las ocasiones, la zona se encuentra muy alterada y resulta difícil trazar los límites del humedal *in situ*.
- Para las formaciones palustres conservadas, se realizaron croquis a escala *in situ*, que tras su comparación con las medidas ofrecidas por la cartografía y foto aérea, sirvieron para dar unos valores más precisos.

Otras relaciones morfométricas fueron realizadas a partir de éstas: *desarrollo de costa o índice de forma (DC)*, *anchura máxima/longitud máxima (ANCH/LONG)* (Hutchinson, 1975) y *superficie/profundidad potencial (SUP/PROF)* (George & Maitland, 1984).

A la matriz obtenida (Apéndice 5.1) se le aplicó un Análisis de Varianza para cada variable de forma que se pudiera verificar si los sectores ambientales propuestos eran significativamente diferentes para los parámetros físicos utilizados.

Dado que la mayoría de los variables morfométricas,

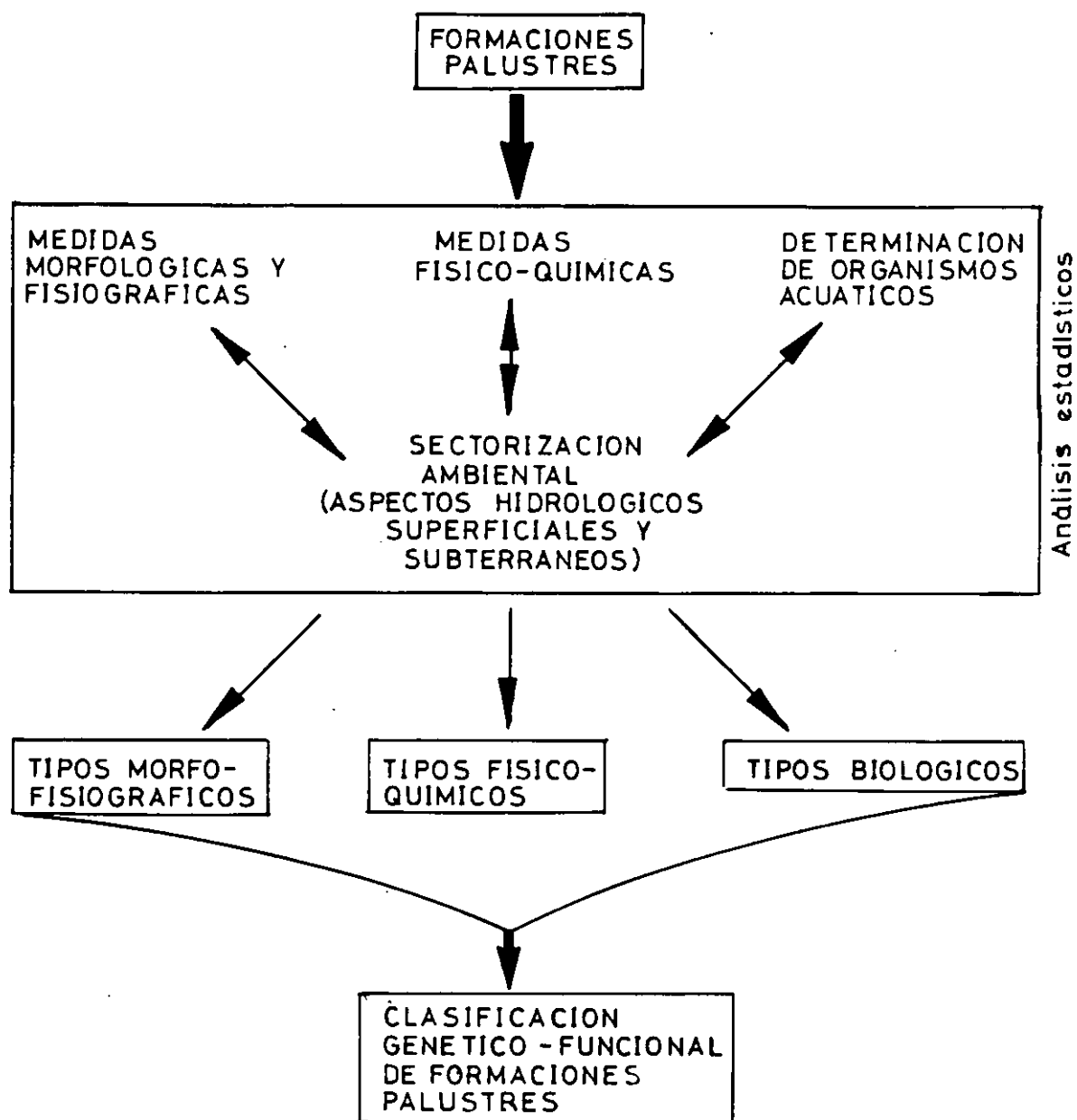


FIGURA 5.1. Metodología utilizada para clasificar las formaciones palustres del acuífero de Madrid con criterios genético-funcionales.

TABLA 5.1. Variables morfológicas y fisiográficas utilizadas para caracterizar los humedales del acuífero de Madrid.

NOMBRE DE LA VARIABLE	CODIGO	UNIDADES DE MEDIDA	CALCULO DE LA EXPRESION	REFERENCIA
ALTITUD	ALT	m	L	-
DISTANCIA MINIMA AL CAUCE MAS CERCANO	DR	Km	L	-
DISTANCIA A LA CHARCA MAS CERCANA	DCH	Km	L	-
PERMANENCIA DEL AGUA	PERM	mes	directa	-
SUPERFICIE	SUP	ha	L <sup>2</sup>	Hutchinson (1975)
ANCHURA MAXIMA	ANCH	m	L	Hutchinson (1975)
LONGITUD MAXIMA	LONG	m	L	Hutchinson (1975)
PERIMETRO	PERI	m	L	Hutchinson (1975)
PROFUNDIDAD POTENCIAL	PROF	m	L	Millar (1973)
DESARROLLO DE COSTA O INDICE DE FORMA	DC	-	PERI/2π SUP	Hutchinson (1975)
ANCH. MAX/LONG. MAX	ANCH/LONG	-	ANCH/LONG	Hutchinson (1975)
SUPERF/PROF.	SUP/PROF	m	SUP/PROF	George & Maitland (1984)

empleadas, no se ajustaban a una distribución normal imprescindible para realizar este tipo de análisis estadísticos (Sokal & Rohlf, 1979), se procedió a su transformación, de forma que los valores de sesgo y kurtosis se aproximaran a los aceptados para el número de muestras analizadas (Snedecor & Cochran, 1976) (Tabla 5.2).

### **5.2.2. Muestreo y análisis de variables físico-químicas.**

La toma de muestras de agua en las 17 lagunas conservadas del área de estudio, se realizó durante dos períodos del año 1987: de Febrero a Abril y en el mes de Mayo. Estos intervalos coinciden aproximadamente con dos de las tres fases que caracterizan el ciclo hidrológico de los humedales de la zona: una fase de recarga en donde el balance entradas-salidas de agua es altamente positivo y estos se llenan de agua. Otra de retención hídrica en donde el balance se iguala y la charca ni pierde ni gana agua y por último, una fase en la que el balance se hace negativo y la cubeta pierde progresivamente agua hasta quedarse completamente seca.

En algunos humedales, se tomó más de una muestra en cada período, por poseer más de una cubeta diferenciada. Este es el caso de laguna de Las Torres (3 cubetas), Arroyo Aguajil (2 cubetas) y Sanchibuey (2 cubetas).

En total se tomaron 34 muestras de dos litros de agua en botella de polietileno (Mackeret et al., 1978).

Para realizar la medida de fosfato se recogieron 250 ml de agua en botella de vidrio a la se añadió 1,5 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  4N (López, 1983). También se tomaba en botella de vidrio de DBO, agua para el posterior análisis del oxígeno disuelto, que era fijada con 1 ml de IK y 1 ml de  $\text{MnSO}_4$  (método de análisis Winkler).

Las medidas de profundidad del agua, temperatura instantánea del agua, conductividad eléctrica a 25° C con constante de célula de 1, y pH se realizaba *in situ* mientras se recogían las muestras de agua que servirían para realizar el resto de análisis.

Las determinaciones de la alcalinidad, oxígeno disuelto, salinidad, turbiedad y el filtrado de las muestras para la medida de pigmentos se realizaron al llegar al laboratorio y el tiempo analítico de las medidas de las distintas formas de nitrógeno y el fósforo no excedió de las 48 horas desde su toma.

Para el resto de los parámetros, las muestras se conservaron en un congelador entre -10°C y -15°C (Philbert, 1973; Allen, 1974) para su posterior procesado.

En total se analizaron 20 parámetros físico-químicos, utilizando diversos métodos analíticos que quedan sintetizados en la Tabla 5.3.

Los resultados de todos los análisis físico-químicos se relacionan en el Apéndice 5.2.

Para relacionar las características químicas de las aguas superficiales con las subterráneas, se seleccionaron de los trabajos de Martínez Alfaro (1977);

**TABLA 5.2. Transformaciones aplicadas a las variables morfométricas y fisiográficas para acercarlas a la distribución normal.**

VARIABLE	TRANSFORMACION APLICADA
Altitud	x
Distancia mínima al cauce más cercano	x
Distancia a la charca más cercana	$1/\sqrt{x}$
Permanencia del agua	$\sqrt{x}$
Superficie	$\sqrt{x}$
Anchura máxima	x
Longitud máxima	$1/\sqrt{x}$
Perímetro	$1/\sqrt{x}$
Profundidad potencial	x
Desarrollo de costa	$1/\sqrt{x}$
Anch. máx./Long. máx	x
Superf/Profund.	x



TABLA 5.3. Parámetros físico-químicos analizados en las muestras de agua tomadas en las formaciones palustres del acuífero de Madrid. Se señala la unidad de medida, método empleado y referencia bibliográfica.

PARAMETRO	UNIDAD	METODO	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA
Conductividad	µS/cm	Conductivímetro	-
Salinidad (TSD)	g/l	Gravimétrico	APHA (1985)
CO3= + CO3H-	meq/l	Volumétrico (Ac. sulfúrico)	APHA (1985)
Cl-	meq/l	Volumétrico (Argentométrico)	APHA (1985)
SO4=	meq/l	Colorimétrico (Tween 80)	APHA (1985)
Ca++	meq/l	Volumétrico (EDTA)	APHA (1985)
Mg++	meq/l	Volumétrico (EDTA)	APHA (1985)
Na++	meq/l	Eléctrico (analizador de iones EA-940 ORION)	APHA (1985)
K+	meq/l	Eléctrico (analizador de iones EA-940 ORION)	-
pH	uds. pH	Indicadores de pH	-
O2 disuelto	mg/l	Winkler	Carpenter (1965)
NO2=	µg-at/l	Colorimétrico (Griess)	APHA (1985)
NO3=	µg-at/l	Colorimétrico (brucina)	APHA (1985)
NH4+	µg-at/l	Eléctrico (analizador de iones EA-940 ORION)	-
PO4=	µg-at/l	Colorimétrico (molibdato)	APHA (1985)
SiO2	mg/l	Colorimétrico (molibdato)	APHA (1985)
Clorofila a	mg/m3	Colorimétrico (Metanol)	Aminot & Chaussepied (1983)
Turbiedad	U.N.	Turbidímetro	Aminot & Chaussepied (1983)
Sestón total	mg/l	Gravimétrico	-
Temperatura	°C	Termómetro	Mortimer (1953)

Rebollo (1977); Sastre (1978); Fernández Uría (1984) y Rubio (1984) todos aquellos pozos que rodearan al humedal en un radio aproximado de 5 kms y poseyeran una batería de análisis químicos completa (Apéndice 5.3).

También se tomaron muestras de agua de lluvia en la Universidad Autónoma de Madrid en cuatro períodos del año 1988 y en dos charcos de lluvia efímeros inmediatamente después de la lluvia situados sobre raña y arenas respectivamente (Apéndice 5.4).

Todos los datos, se sometieron al cálculo del porcentaje de error cometido en las determinaciones analíticas a partir de la expresión (Custodio & Llamas, 1983):

$$\% \text{ ERROR} = \frac{\text{Cationes} - \text{Aniones}}{\text{Cationes} + \text{Aniones}} \times 100$$

El error admitido en general en la realización de análisis químicos varía de 2-15% dependiendo del grado de mineralización de la muestra, aunque en análisis rutinarios pueden admitirse errores algo superiores (Custodio & Llamas, 1983).

En nuestro caso, hemos aceptado errores de hasta el 10% (Apéndices 5.2; 5.3; 5.4) ya que este valor se ha considerado suficientemente aceptable teniendo en cuenta los rangos de conductividad con que trabajamos y los métodos analíticos empleados en nuestro laboratorio.

Para ratificar la ausencia de errores

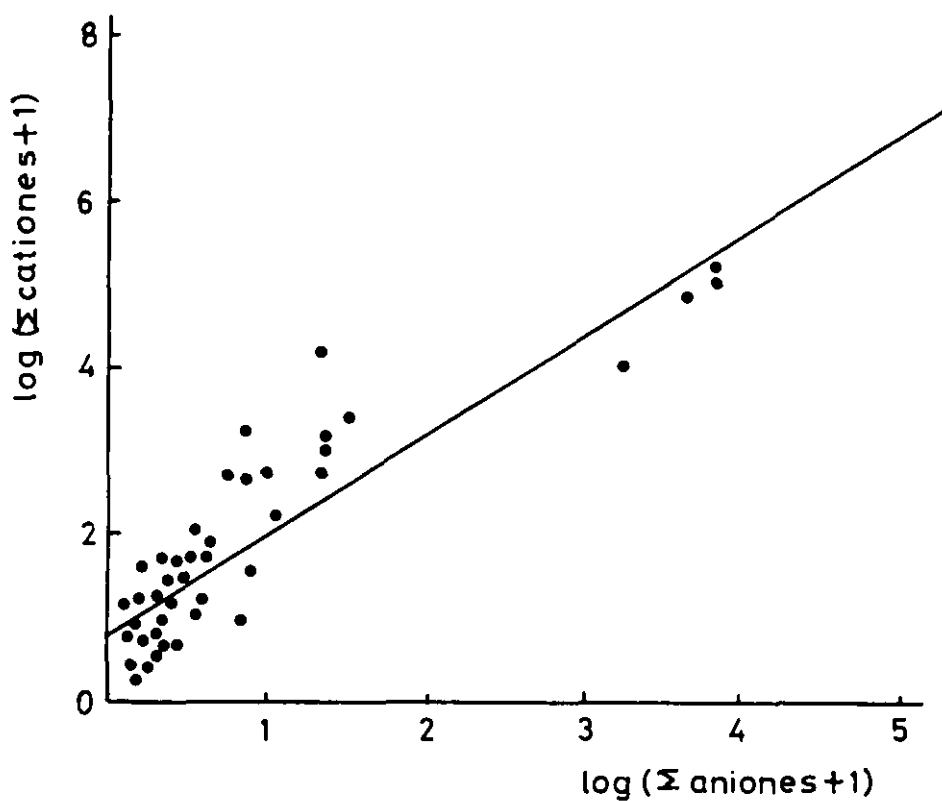
significativos en los datos empleados en este estudio, se utilizó el método de control propuesto por Haines & Akielaszek (1983), en el que mediante un Análisis de Correlación y Regresión entre la suma de aniones y suma de cationes, se determinan el grado de asociación entre ellos, y por consiguiente el error cometido en la realización del análisis. Se utilizaron los datos transformados mediante  $\log(x+1)$ .

En la Figura 5.2 se muestra, como el coeficiente de correlación del análisis, es altamente significativo ( $r=0,90$ ), así como la ecuación de la recta de regresión, que explica el 82,46% de la variación total y es significativa al 95% de nivel de confianza.

De esta forma, queda ampliamente comprobado que los resultados analíticos empleados en este estudio proporcionan un alto grado de validez a las conclusiones que de ellos se deriven.

El análisis de la información aportada por estos datos físico-químicos se efectuó utilizando técnicas estadísticas monovariantes (medidas de tendencia central), bivariantes (Análisis de Regresión y Correlación y Análisis de la Varianza) y multivariantes (Análisis factorial en Componentes Principales y Análisis de Correlaciones Canónicas) comunmente utilizadas en trabajos cuantitativos de ecología. Para estas dos últimas técnicas, se utilizaron los programas P4M y P6M del paquete estadístico BMDP (Dixon & Brown, 1987).

La mayoría de los parámetros utilizados no se ajustaban a una distribución normal, necesaria para el empleo de técnicas multivariantes (Ramirez Díaz et al.,



$$r=0.90$$

$$y=0.79x+1.22$$

**FIGURA 5.2.** Regresión lineal entre la suma de aniones y cationes, expresado en meq/l, como método de control para reconocer el grado de error cometido al realizar análisis químico según Haines & Akielaszek, 1983.

1976; González Bernáldez & Díaz Pineda, 1978) y bivariantes (Sokal & Rohlf, 1979), por ello se procedió a su transformación (Tabla 5.4) y los nuevos valores de sesgo y kurtosis fueron sometidos a tests estadísticos (Snedecor & Cochran, 1976) donde se comprobó que la mayoría no sobrepasaban los rangos aceptados.

### 5.2.3. Muestreo de fauna y vegetación acuáticas.

En las 17 lagunas existentes en el acuífero de Madrid, se realizaron muestreos cualitativos de varios grupos funcionales de organismos.

Mediante una red de 270 micras de poro se rastreó el fondo de las lagunas de forma homogénea para obtener información cualitativa de las comunidades bentónicas presentes. Con una red de 50 micras de poro, se muestreó la lámina de agua para recoger la fracción de organismos que en estos medios poco profundos se sitúan entre la fauna bentónica y planctónica (meiobentos), constituida fundamentalmente por crustaceos.

Ambos tipos de muestras fueron conservadas con formol al 4% hasta su posterior separación y determinación.

Por otro lado, se herborizaron los macrófitos acuáticos presentes y se conservaron en pliegos para su posterior determinación, con la excepción de las caráceas que fueron conservadas en formol al 4%.

La matriz de ausencia-presencia obtenida (Apéndice 5.5) fue sometida a un Análisis DECORANA (Detrended Correspondence Analysis) (Hill, 1979) que examina la similaridad de localidades en función de la presencia de las especies, reduciendo el efecto de arco que producen otras técnicas de ordenación. Con ello se facilita la obtención de una tipificación de lagunas en base a las comunidades de organismos presentes.

### ***5.3. MORFOMETRIA PALUSTRE Y REGIMEN HIDRICO EN RELACION CON LOS FLUJOS DE AGUA SUBTERRANEA***

#### **5.3.1. Tamaño, forma y permanencia del agua.**

Las 53 formaciones palustres que existieron en el área de estudio, poseían en general, un pequeño tamaño, con un rango que oscila entre 0,0025 y 5,43 has, medidas correspondientes a Ojo del Bravo (Toledo) y laguna de Mari Pascuala (Madrid) respectivamente (Apéndice 5.1). Esta última, se encuentra desecada en la actualidad. Se sitúan en un rango de altitud relativamente estrecho, entre 376 y 680 m y presentan formas muy variables aunque predominan las redondeadas y poco profundas.

En general, se pueden observar algunas tendencias de las charcas conservadas con respecto a los sectores ambientales delimitados (Tabla 5.5):

**TABLA 5.4. Transformaciones aplicadas a las variables físico-químicas analizadas, para acercarlas a la distribución normal.**

VARIABLE	TRANSFORMACION APLICADA
<b>LAGUNAS</b>	
Conductividad	$x$
Salinidad	$1/\sqrt{x}$
Alcalinidad	$\log(x+1)$
Cloruro	$1/\sqrt{x}$
Sulfato	$1/\sqrt{x}$
Calcio	$1/\sqrt{x}$
Magnesio	$1/\sqrt{x}$
Sodio	$1/\sqrt{x}$
Potasio	$1/\sqrt{x}$
pH	$x$
Oxígeno disuelto	$\sqrt{x}$
Nitrito	$\sqrt{x}$
Nitrato	$\log(x+1)$
Amonio	$\log(x+1)$
Fosfato	$x$
Silicato	$x$
Clorofila a	$1/\sqrt{x}$
Turbiedad	$1/\sqrt{x}$
Temperatura	$x$
<b>POZOS</b>	
Conductividad	$1/\sqrt{x+1}$
Salinidad	$1/\sqrt{x}$
Alcalinidad	$x$
Cloruro	$1/\sqrt{x}$
Sulfato	$1/\sqrt{x+1}$
Calcio	$1/\sqrt{x+1}$
Magnesio	$1/\sqrt{x+1}$
Sodio	$1/\sqrt{x}$
Potasio	$x$
pH	$x$

TABLA 5.5. Estadísticos más importantes de parámetros morfométricos y fisiográficos de las lagunas conservadas en el acuífero de Madrid.

SECTOR 1					SECTOR 2				
n=2					n=4				
	RANGO	$\bar{X}$	$\sigma$	CV(%)	RANGO	$\bar{X}$	$\sigma$	CV(%)	
ALT (m)	380-400	390	10	2.5	440-445	442.5	2.5	0.56	
DR (Km)	0.4-1.0	0.7	0.3	42.8	0.8-2	1.24	0.45	36.44	
DCH (Km)	2.5-3.0	2.7	0.2	9.0	0.4-0.6	0.5	0.07	14.14	
PERM (mes)	-	6	0	0	4-5	4.5	0.5	11.1	
SUP (ha)	0.16-0.20	0.18	0.02	11.1	0.01-0.95	0.34	0.38	112.6	
ANCH (m)	43.9-29.9	36.9	7	18.9	8.4-79.8	40.6	31.69	78	
LONG (m)	59.6-71.8	65.7	6.1	9.2	14.6-155.3	67.3	56.9	84.5	
PERI (m)	184.2-311.2	247.7	63.4	25.6	36.7-446.1	193.1	166.6	86.3	
PROF (m)	0.15-0.20	0.17	0.02	14.7	0.2-0.80	0.47	0.23	50.7	
DC	1.16-2.19	1.67	0.51	30.8	1.03-1.29	1.1	0.10	9.62	
ANCH/LONG	0.41-0.72	0.56	0.15	27.6	0.51-0.79	0.6	0.11	18.38	
SUP/PROF(m)	8000-13333	10666.5	2666.5	24.9	333-15833	5516.5	6222.49	112.79	

SECTOR 3					SECTOR 4				
n=3					n=8				
	RANGO	$\bar{X}$	$\sigma$	CV(%)	RANGO	$\bar{X}$	$\sigma$	CV(%)	
ALT (m)	460-465	461.6	2.35	0.5	475-685	628.12	67.49	10.7	
DR (Km)	0.6-1.5	1.2	0.42	35	0.5-3.6	1.9	1.23	65.26	
DCH (Km)	2.0-3.2	2.66	0.49	18	0.2-3.0	0.88	0.83	95.14	
PERM (mes)	-	8	0	0	4-7	5.12	1.16	22.65	
SUP (ha)	0.0025-014	0.055	0.060	109	0.01-0.30	0.12	0.11	96.26	
ANCH (m)	2.11-11.52	6.27	3.91	62	7.1-47.5	22.9	17.33	75.71	
LONG (m)	6.3-337.9	122.76	152.30	124	14.43-79.06	35.4	23.6	66.6	
PERI (m)	18-718.08	272.32	316.23	116	37.7-268.3	115.1	80.3	69.76	
PROF (m)	0.30-1.20	0.6	0.42	70	0.1-1.25	0.67	0.36	54.2	
DC	1.01-5.41	2.62	1.98	75	1-1.89	1.26	0.31	24.97	
ANCH/LONG	0.006-0.82	0.432	0.33	77	0.3-0.88	0.61	0.19	31.80	
SUP/PROF(m)	20.83-4666	1839.9	2025.6	110	96-20000	5925.3	7143.03	120.55	



a) Por un lado, la existencia de lagunas pequeñas, redondeadas y profundas (en torno a 1 m) que reciben el nombre genérico de "ojos" denota la existencia de flujos de agua subterránea ascendente (González Bernáldez et al., 1989b). En la actualidad se conservan cuatro humedales de este tipo en el acuífero de Madrid: los dos de Aguajil, Navazarza y Ojo del Bravo.

b) Por otro lado, aparecen lagunas más grandes, de contornos irregulares y someras tanto en áreas de descargas de flujos regionales (Ejs. Las Torres o Manantial de la Mata) como de recarga regional (Ej. Buenavista) y rañas (Ej. Retamalón). Este último sector (nº 2) presenta las lagunas más grandes del área de estudio ( $\bar{x} = 0,34$  has) aunque se trata de un grupo muy heterogéneo (c.v. = 112,6%) (Tabla 5.5).

Estos patrones morfológicos se ven más acentuados cuando se aborda el estudio de humedales como un continuo, considerando desde criptohumedales a formaciones palustres. Así, González Bernaldez et al. (1989b) y Rey Benayas et al. (1989) encuentran para las cuencas del acuífero de Madrid y del Duero, que las formaciones palustres en regiones de descarga local tienden a ser pequeñas y redondas, mientras que las que aparecen en zonas de descarga regional y subregional tienden a ser relativamente alargadas y asimétricas. Diferencias igualmente marcadas, encuentran para los criptohumedales de ambos acuíferos.

El Análisis de Varianza efectuado con todas las variables físicas medidas en las lagunas (Tabla 5.6), demuestra como son la altitud (ALT), permanencia del agua (PERM) y distancia a la charca más próxima (DCH)

las variables que discriminan los sectores ambientales trazados en el acuífero de Madrid con un nivel de confianza del 95%.

Es interesante comprobar como para estas tres variables, el sector más heterogéneo, con coeficientes de variación mayores es el que engloba áreas de descarga local y recarga regional (nº4) (Tabla 5.5), lo que pone en evidencia la existencia en esta zona de formaciones palustres con diferente origen y funcionamiento hidrológico.

La *altitud* presenta en general coeficientes de variación bajos en todas las unidades ambientales (<11%) (Tabla 5.5) siendo el área de recarga regional y descarga local (nº4) el de mayor altitud sobre el nivel del mar, con un valor medio de 628,12 m, seguido por el de descarga intermedia ( $\bar{x}=442,5$  m), raña ( $\bar{x}=442,5$  m) y finalmente descarga regional ( $\bar{x}=390$  m).

Esta distribución, responde claramente a los modelos hidrogeológicos realizados para el acuífero de Madrid (Fernandez Uría et al., 1985) de forma que las áreas de recarga están situadas en terrenos topográficamente más altos, mientras que las zonas eminentemente bajas corresponden a áreas de descarga de agua subterránea.

Una excepción lo constituyen las lagunas situadas sobre las rañas del extremo SW del área de estudio. Como ya se indicó, estos materiales se depositaron con posterioridad a los materiales terciarios de la cuenca sedimentaria de Madrid, y su enclave actual corresponde a antiguas regiones de descarga intermedia del acuífero regional próximas al río Alberche, y por

**TABLA 5.6. Resultados del análisis de la varianza efectuado con datos fisiográficos de las formaciones palustres del acuífero de Madrid.**

VARIABLE	F	g.l.	
		INTERGRUPO	INTRAGRUPPO
ALT	18.98*	3	13
DR	0.96**	3	13
DCH	4.59*	3	13
PERM	7.28*	3	13
SUP	0.73**	3	13
ANCH	1.53**	3	13
LONG	0.51**	3	13
PERI	0.52**	3	13
PROF	1.03**	3	13
DC	1.36**	3	13
ANCH/LONG	0.43**	3	13
SUP/PROF	0.69**	3	13

\*  $\alpha < 0.05$

\*\* No significativo.

tanto más bajas.

Con respecto a la *permanencia del agua*, se observa como los sectores definidos como de descarga de flujos de agua subterránea intermedios (nº3) o regionales (nº1) poseen lagunas con el mismo tiempo de permanencia del agua en sus cubetas (coeficientes de variación de 0%), siendo además estos periodos algo más prolongados que los registrados en las lagunas de los restantes sectores del área de estudio.

Es evidente que la influencia del agua subterránea en el régimen hídrico de algunas lagunas, aumenta su período de inundación en cada ciclo hidrológico, confiriendo mayor estabilidad a estos sistemas. Para las lagunas pertenecientes a los sectores 1 y 3 se ha encontrado que la etapa de encharcamiento se prolonga desde los meses de Octubre-Noviembre hasta Mayo-Junio, momento en el que se secan (Figura 5.3).

Las formaciones palustres de los sectores 2 y 4, sin embargo permanecen inundadas desde Enero-Febrero hasta Mayo-Junio, excepto los ojos de Navazarza y Aguajil que se asemejan más a las lagunas con influencia del agua subterránea (Figura 5.3).

La variable *distancia a la charca más cercana*, permite diferenciar también a aquellas lagunas asentadas sobre terrenos de descarga, con gran tendencia a aparecer agrupadas en núcleos palustres con distancias entre charcas pequeñas, frente a la gran dispersión de las lagunas de descarga local y recarga regional consideradas en su conjunto (c.v.=95,14%) (Tabla 5.5).

### **5.3.2. Tipos de formaciones palustres en función de sus características morfo-fisiográficas.**

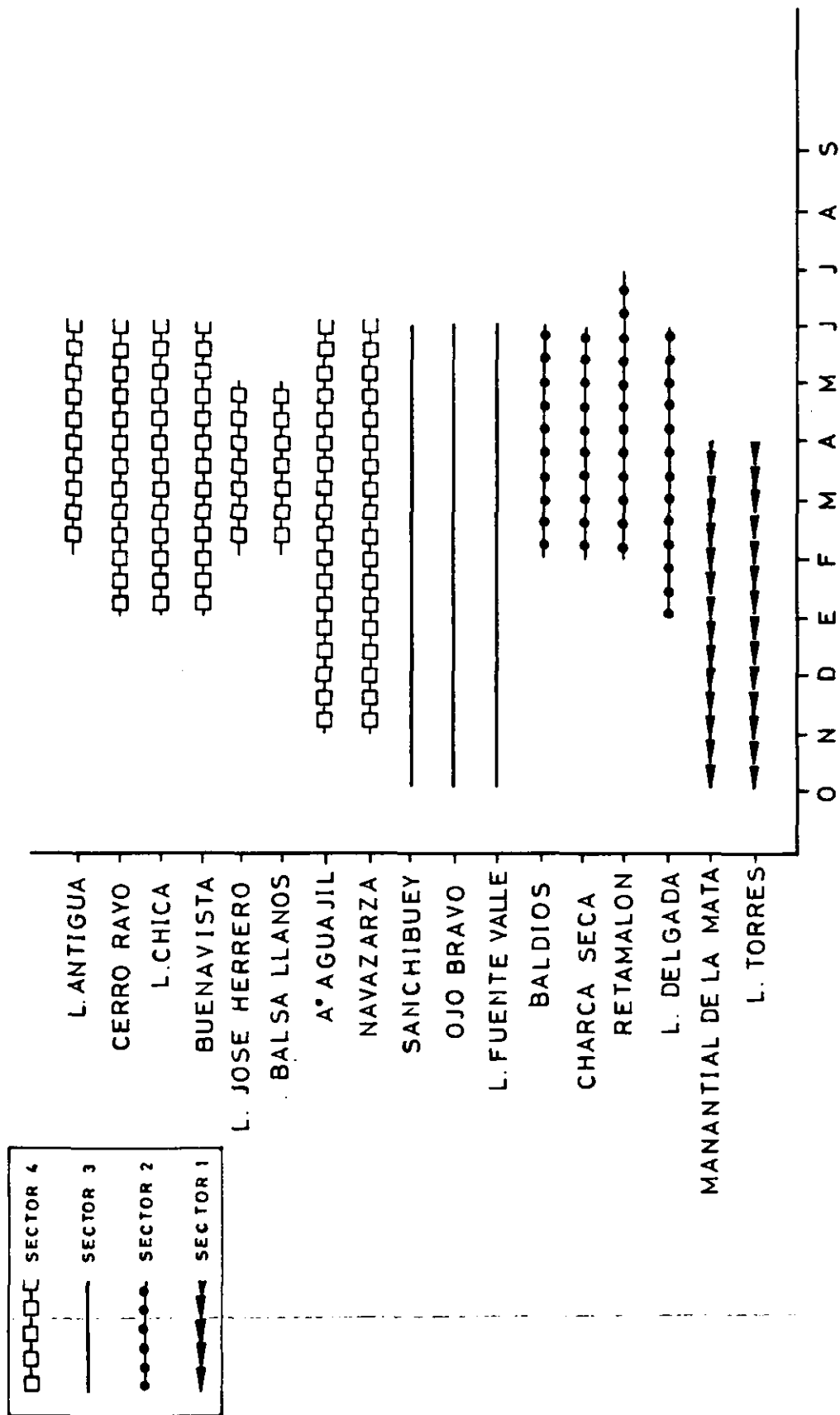
Las tendencias generales observadas, permiten agrupar a las formaciones palustres en tres tipos morfo-fisiográficos pertenecientes a sectores con rasgos genéticamente comunes. En la Figura 5.4 se observa como cada sector ambiental presenta un único tipo morfo-fisiográfico, excepto el área del sector 4 que presenta dos tipos de formaciones palustres: por un lado, el grupo más numeroso se asimila a las regiones de recarga del acuífero de dicho sector y posee rasgos morfométricos semejantes a las lagunas del sector 2 o de rañas, mientras que los ojos de Navazarza y Aguajil, con formas redondeadas y profundas similares a las formaciones palustres del sector 3, se pueden interpretar como humedales de descarga local dentro del sector 4.

A continuación se detallan las características de cada tipo definido, así como las lagunas que lo conforman y el sector ambiental al que pertenecen:

#### **- Tipo morfo-fisiográfico 1 (MF1).**

Lagunas de formas irregulares, someras, más o menos grandes y con presencia de playa. Su período de inundación comienza en otoño, con las primeras lluvias y se prolonga hasta la primavera, sin demasiadas oscilaciones en el nivel de agua.

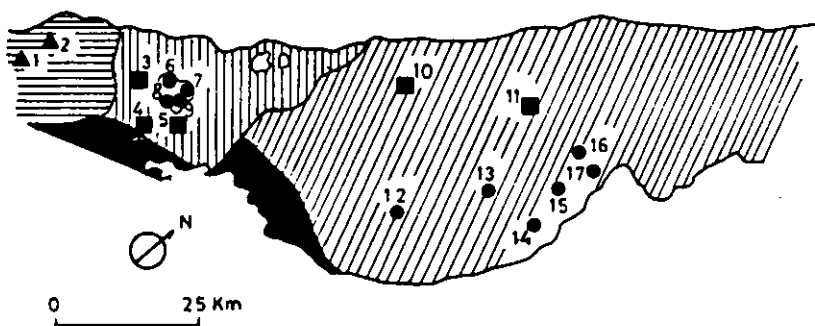
Pertenecen a este tipo todas las lagunas situadas











**FIGURA 5.3.** Duración media del período de inundación en cada formación palustre del acuífero de Madrid.

# **FORMACIONES PALUSTRES**







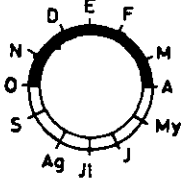


- 1-MANANTIAL DE LA MATA
- 2-LAG. DE LAS TORRES
- 3-OJO DEL BRAVO
- 4-FUENTE DEL VALLE
- 5-SANCHIBUEY
- 6-CHARCA SECA
- 7-LOS BALDIOS
- 8-RETAMALON
- 9-LAG. DELGADA
- 10-NAVAZARZA
- 11-A° AGUAJIL
- 12-BUENAVISTA
- 13-LAG. CHICA
- 14-LAG. ANTIGUA
- 15-CERRO DEL RAYO
- 16-BALSA DE LOS LLANOS
- 17-LAG. JOSE HERRERO



-  SECTOR 1
-  SECTOR 2
-  SECTOR 3
-  SECTOR 4
-  SECTOR 5

-  TIPO MORFO-FISIOGRAFICO 1
-  TIPO MORFO-FISIOGRAFICO 2
-  TIPO MORFO-FISIOGRAFICO 3

## **TIPOS**

		▲MF1	■MF2	●MF3
MORFOMETRIA	PERFIL			
	PLANTA			
PRESENCIA DE PLAYA		SI	NO	SI
PERMANENCIA DEL AGUA				

**FIGURA 5.4.** Características que definen 3 tipos morfo-fisiográficos de formaciones palustres en el acuífero de Madrid. (Para explicaciones ver texto).

sobre el sector ambiental 1 (Manantial de la Mata y Laguna de las Torres), de descarga regional. Puede considerarse que la influencia del agua subterránea se manifiesta de forma importante en estos sistemas.

- Tipo morfo-fisiográfico 2 (MF2).

Pertenecen a este tipo, todos los sistemas acuáticos que se vienen denominando "ojos" en este trabajo.

Se trata de pequeñas charcas, de formas redondeadas, profundas y sin playa.

El tiempo que mantienen agua en cada ciclo hidrológico es prolongado y al igual que ocurría en el tipo MF1 no se producen oscilaciones del nivel de agua demasiado drásticas.

También aquí la influencia del agua subterránea es importante, perteneciendo a este grupo, todas las lagunas del sector ambiental 3 (descarga intermedia) (ojo del Bravo, Fuente del Valle y Sanchibuey) y aquellas del sector 4 que se perfilan como de descarga local, esto es, ojo de Navazarza y ojo de Aº Aguajil.

- Tipo morfo-fisiográfico 3 (MF3).

Se trata de lagunas de gran tamaño, someras, redondeadas y con presencia de playa.

Todas ellas tienen periodos de inundación relativamente cortos y lo que es más importante,



comienzan a mantener agua en los meses invernales, ya que en general no acusan las primeras lluvias de otoño.

Son formaciones palustres influídas mayoritariamente por las aguas superficiales y muy especialmente por la precipitación atmosférica.

Pertenecen a este tipo todas las lagunas del sector ambiental 2 (rañas) (Charca Seca, Los Baldíos, Retamalón y Laguna Delgada) y todas aquellas del sector 4 que se pueden considerar de recarga regional (Buenavista, Laguna Chica, Laguna Antigua, Cerro del Rayo, Balsa de los Llanos y Laguna de José Herrero).

#### **5.4. CARACTERIZACION HIDROQUIMICA SUPERFICIAL EN RELACION CON EL GRADO DE MINERALIZACION DEL AGUA SUBTERRANEA.**

##### **5.4.1. Relaciones entre medidas de conductividad y salinidad.**

La mineralización global o salinidad del agua, se debe fundamentalmente a la contribución de algunos iones que se encuentran presentes en disolución de forma mayoritaria:  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{=}$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^-$  y  $\text{CO}_3^{=}$  (Eugster & Hardie, 1978; Wetzel, 1981), influyendo en la mineralización total en torno a un 88% (Alonso, 1985).

Los métodos más habituales para determinar el contenido total de sales disueltas suelen ser entre

otros (Hammer, 1986) a través de la conductividad eléctrica, que mide la resistencia de la disolución al flujo eléctrico; con la estimación del total de sólidos disueltos (TSD) en el agua, mediante la evaporación total a 105° C (residuo seco) y con la suma de los iones mayoritarios que se encuentran disueltos en el agua (que en nuestro caso hemos denominado salinidad).

Esta gran variedad de procedimientos de medida conduce en muchos casos a la confusión, ya que la conversión de unas unidades en otras puede llegar a ser complicado al variar su grado de relación en función de la temperatura, salinidad total o composición iónica de la muestra.

La necesidad de estandarizar las medidas es evidente (Heurteaux, 1988) y el encontrar un modelo que prediga los valores de salinidad (parámetro en el que se basan los sistemas de clasificación de aguas epicontinentales) en función de las medidas de conductividad eléctrica, puede resultar un avance metodológico importante (Williams, 1966; Hammer, 1978; Martino, 1988; Bernues, 1990): por un lado, la conductividad eléctrica resulta una medida directa bastante precisa (sobre todo con el uso de conductivímetros con compensador automático de temperatura), y por otro, la medida es rápida y sencilla, pudiéndose efectuar *in situ* y evitando los errores de estimación que pueden producirse en el método de TSD si no se manipulan las muestras con extremo cuidado.

En las formaciones palustres del área estudiada, se analizaron las tres medidas; sin embargo se detectaron grandes diferencias (a veces en torno al 50%) entre los

valores obtenidos para la salinidad (entendendida como suma de iones mayoritarios) y TSD. Se decidió trabajar con el parámetro salinidad, ya que su fiabilidad era mayor, al tratarse de una estimación realizada a partir de datos con un error analítico  $\leq 10\%$  (ver apartado 5.2.2).

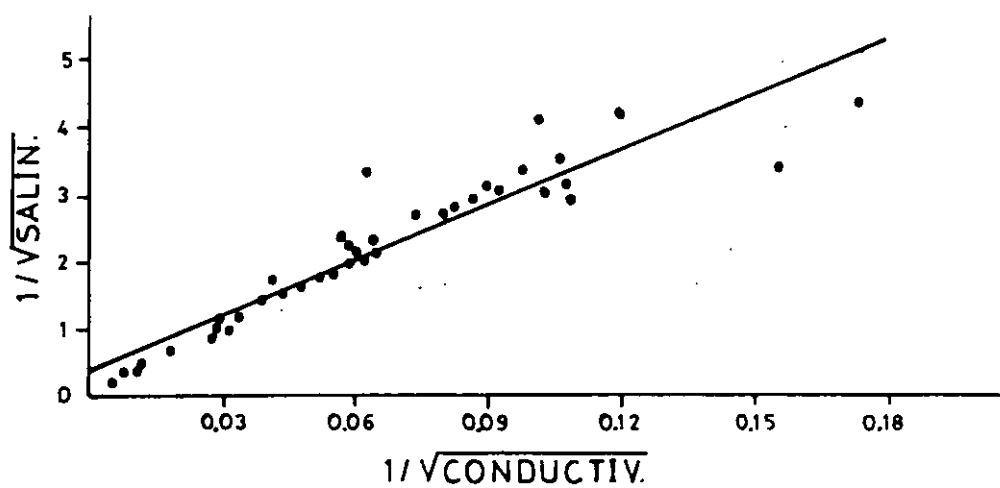
Las relaciones conductividad-salinidad para las lagunas del acuífero de Madrid se muestran en la Figura 5.5. Se ha realizado un Análisis de Regresión y Correlación, que resulta significativo al 95% de confianza, con un coeficiente de correlación de 0,93.

Al considerar la conductividad como variable independiente y haber utilizado estos parámetros transformados mediante  $1/\sqrt{x}$  (Tabla 5.4) resulta que:

$$1/\sqrt{\text{salinidad}} = 0,39 + 26,61 * 1/\sqrt{\text{conductividad}}$$

donde  $\text{SALINIDAD} = (0,39 + 26,61 * \frac{1}{\sqrt{\text{conduc.}}})^{-1/2}$

La diferencia entre la conductividad hallada mediante este modelo y la conductividad medida en las lagunas (% de error) se representó frente a la conductividad real (Figura 5.6) resultando los mayores errores para muestras muy dulces y muy saladas. En efecto, como se observa en la figura, algunas muestras con valores de conductividad bajos, pueden llegar a errores de hasta el 15%, mientras que las muestras situadas entre 500 y 1.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de conductividad, no superan el 10% de error. Pero es a partir de 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , cuando el porcentaje de error se dispara a



$$r = 0.93$$

$$y = 0.39 + 26.6x$$

FIGURA 5.5. Regresión efectuada entre la conductividad y la salinidad de las muestras analizadas. Valores transformados mediante  $1/\sqrt{x}$ . —

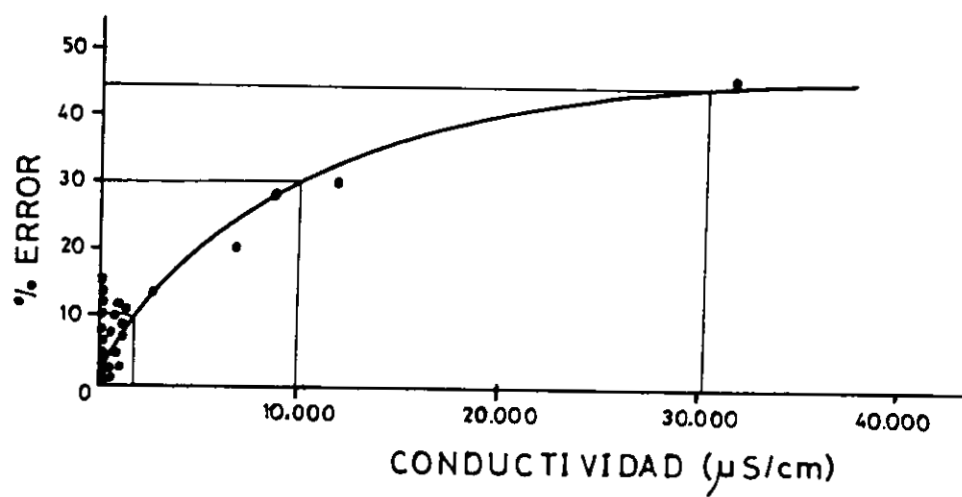


FIGURA 5.6. Representación del porcentaje de error entre conductividad teórica y real, frente a conductividad real de las muestras analizadas.

valores mayores del 30% . Hay que destacar sin embargo, que para valores de conductividad altos, en torno a 30.000-40.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  el error comienza a estabilizarse, observándose una tendencia a permanecer entre 40-50%. Resultados similares fueron comprobados con anterioridad por Bernues (1990) y posiblemente estas diferencias en las distintas medidas de salinidad sean producidas por el empleo de una sonda de conductividad con un sólo tipo de célula (en nuestro caso de constante  $K=1$ ) y que resulta ideal para muestras de salinidad media (concretamente para valores de conductividad de 100 a 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) (M<sup>º</sup> de Agricultura, 1986).

#### 5.4.2. Concentración y composición iónica.

En la Tabla 5.7 figura la concentración media de los iones mayoritarios para cada sector ambiental, así como la desviación típica, coeficiente de variación y valores máximos y mínimos.

En ella se observa como el sector 1 de descarga regional, es el que presenta mayor mineralización en sus aguas superficiales, encontrándose valores medios de conductividad próximos a 15.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con valores entre 6.980  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en la laguna del Manantial de la Mata y 32.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en la laguna de las Torres.

La salinidad media de este sector es de 11,08 g/l con valores máximos de 24,2 g/l pudiéndose considerar sus lagunas como *hiposalinas* o *mesosalinas* según la

clasificación de Hammer et al. (1983) y Hammer (1986).

El sector 3, de descarga intermedia, posee unos valores de conductividad media de 1.320,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Su rango de variación es bajo, encontrándose todas las lagunas que lo integran en torno a ese valor. Su salinidad, varía entre 0,67 y 2,16 g/l, con lo que pueden considerarse *subsalinós* según la clasificación de aguas continentales mencionada.

El resto de los sectores (2 ó rañas y 4 ó recarga regional-descarga local) presentan grados de mineralización similares entre ellas y en general bajos.

Dentro de ellos, la laguna con mayor contenido de sales es el ojo de Aguajil 1 con valores de conductividad de 325  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el muestreo 1 y 362  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el muestreo 2.

En general, las salinidades en estos dos sectores, oscila entre 0,05 y 0,47 g/l; ambos valores son característicos de lagunas *dulces*.

Teniendo en cuenta que, la salinidad aumenta progresivamente, a medida que avanza el ciclo hídrico una misma laguna puede incluirse en diferentes clases de salinidad según el ciclo anual e interanual (Montes & Martino, 1987).

Este hecho se observa en las lagunas del sector de descarga regional del acuífero, donde se sabe por datos tomados en la segunda fase del trabajo (ver capítulo 6) que la salinidad aumenta hacia el final del ciclo de forma considerable, encontrándose valores que permiten

**TABLA 5.7. Estadísticos básicos de iones mayoritarios y otros parámetros químicos medidos en las aguas de las formaciones palustres del acuífero de Madrid en los dos periodos de muestreo.**

SECTOR 1			SECTOR 2					
n=4			n=8					
RANGO	$\bar{X}$	$\sigma$	RANGO	$\bar{X}$	CV (%)			
CONDUCTIVIDAD ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	6980-32000	14947	10008	66.9	33-287	128.3	89.9	70.08
SALINIDAD (g/l)	4.61-24.2	11.08	7.7	69.49	0.05-0.22	0.11	0.06	55.43
ALCALINIDAD TOT (meq/l)	1.82-5.84	3.92	1.81	46.17	0.48-2.13	0.91	0.53	59.34
Cl <sup>-</sup> (meq/l)	47.6-277.2	118.9	92.9	78.13	0.1-0.7	0.27	0.22	82.29
SO4 <sup>=</sup> (meq/l)	27.15-129.6	62.15	39.76	63.97	0.1-1.34	0.38	0.40	106.86
Ca <sup>++</sup> (meq/l)	3.3-14.1	7.17	4.19	58.4	0.2-0.70	0.40	0.16	41.45
Mg <sup>++</sup> (meq/l)	13.2-82.9	45.8	24.75	54.03	0.2-1.2	0.56	0.42	75.00
Na <sup>+</sup> (meq/l)	54-280	127.2	89.5	70.36	0.07-0.6	0.22	0.18	82.67
K <sup>+</sup> (meq/l)	0.15-1.55	0.61	0.55	90.31	0.03-0.75	0.31	0.24	79.97
pH	7-8.6	7.75	0.60	7.74	5-6.5	5.87	0.54	9.28
SiO2 (mg/l)	8.79-14.8	11.36	2.48	21.83	5.78-16.7	11.84	3.98	33.62

SECTOR 3			SECTOR 4					
n=6			n=16					
RANGO	$\bar{X}$	$\sigma$	RANGO	$\bar{X}$	CV (%)			
CONDUCTIVIDAD ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	823-2820	1320.5	690.6	52.30	94-645	277.6	140.74	50.69
SALINIDAD (g/l)	0.67-2.16	1.12	0.50	45.12	0.09-0.47	0.24	0.10	44.15
ALCALINIDAD TOT (meq/l)	6.3-17.08	9.94	3.57	35.94	0.6-4.97	2.37	1.21	51.24
Cl <sup>-</sup> (meq/l)	2.1-11.2	4.16	3.26	78.57	0.1-0.7	0.4	0.18	45.06
SO4 <sup>=</sup> (meq/l)	0.52-2.45	1.08	0.56	52.66	0.2-0.98	0.45	0.19	42.22
Ca <sup>++</sup> (meq/l)	1.5-5.2	3.35	1.34	40.03	0.6-4.5	1.79	1.13	63.58
Mg <sup>++</sup> (meq/l)	1.7-4.3	3.08	0.97	31.50	0.3-1.0	0.62	0.19	30.97
Na <sup>+</sup> (meq/l)	3.45-23.79	8.80	6.98	79.40	0.09-1.27	0.51	0.42	83.79
K <sup>+</sup> (meq/l)	0.03-0.72	0.19	0.24	126.51	0.076-0.65	0.25	0.18	72.97
pH	7.5-8	7.8	0.15	1.92	5.5-7	6.5	0.39	6.08
SiO2 (mg/l)	19.1-5.34	31.06	11.47	36.94	10.92-72.6	25.01	15.99	63.95



englobarlas en el grupo de las *hipersalinas*.

Los patrones hidroquímicos presentados por las lagunas de cada sector, concuerdan con los rangos de salinidad esperados, según la predicción realizada en la Tabla 3.4.

La composición iónica también presenta diferencias para cada sector ambiental.

En el diagrama de Piper efectuado con todas las muestras analizadas (Figura 5.7) se observa, que exceptuando el conjunto de muestras del extremo distal del acuífero (sector 1) que adoptan en la figura una situación marginal en los extremos del  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ , las lagunas de los sectores 2, 3 y 4 quedan distribuidas en una posición central en el caso de los cationes, con tendencias sódicas en el caso del sector de descarga intermedia y claramente alcalinas en el diagrama de los aniones.

Los cálculos de valores medios, desviación típica y coeficientes de variación efectuados para los iones mayoritarios de lagunas de cada sector (Tabla 5.7) también ponen de manifiesto estas tendencias.

El sector 1, con valores medios de  $\text{Cl}^-$  de 118,9 meq/l y de  $\text{Na}^+$  de 127,2 meq/l se distinguen claramente del resto de los sectores, no sólo por su mayor salinidad, como ya se indicó, sino que su composición iónica también es diferente.

Por su parte el sector 3, de tendencia bicarbonatada sódica (alcalinidad media de 9,94 meq/l y concentraciones medias de  $\text{Na}^+$  de 8,80 meq/l) también

manifiesta su personalidad frente al resto de sectores tanto por su composición iónica como por su concentración (valores intermedios de salinidad).

Los sectores 2 y 4 son, sin embargo, muy similares entre sí en cuanto a su composición iónica se refiere, resultando bicarbonatado cálcicas todas las muestras.

Aunque los coeficientes de variación de cada uno de los elementos analizados, son relativamente altos, hay que destacar no obstante, que las tendencias globales apuntadas arriba se manifiestan única y exclusivamente en formaciones palustres pertenecientes al mismo sector.

Por otro lado, es la concentración de silicato (expresada en mg/l) la que posee valores más semejantes para las lagunas de cada sector (valores del coeficiente de variación menor).

#### **5.4.3 Parámetros limnológicos indicadores del estado trófico.**

En la Tabla 5.8 aparecen la concentración media de nutrientes, oxígeno disuelto y clorofila "a" y las medidas de turbiedad para cada sector ambiental, así como su desviación típica, coeficiente de variación y valores máximos y mínimos.

En casi todos los casos los coeficientes de variación obtenidos tienen valores altos (>50%) debido a la gran heterogeneidad que presentan las lagunas de

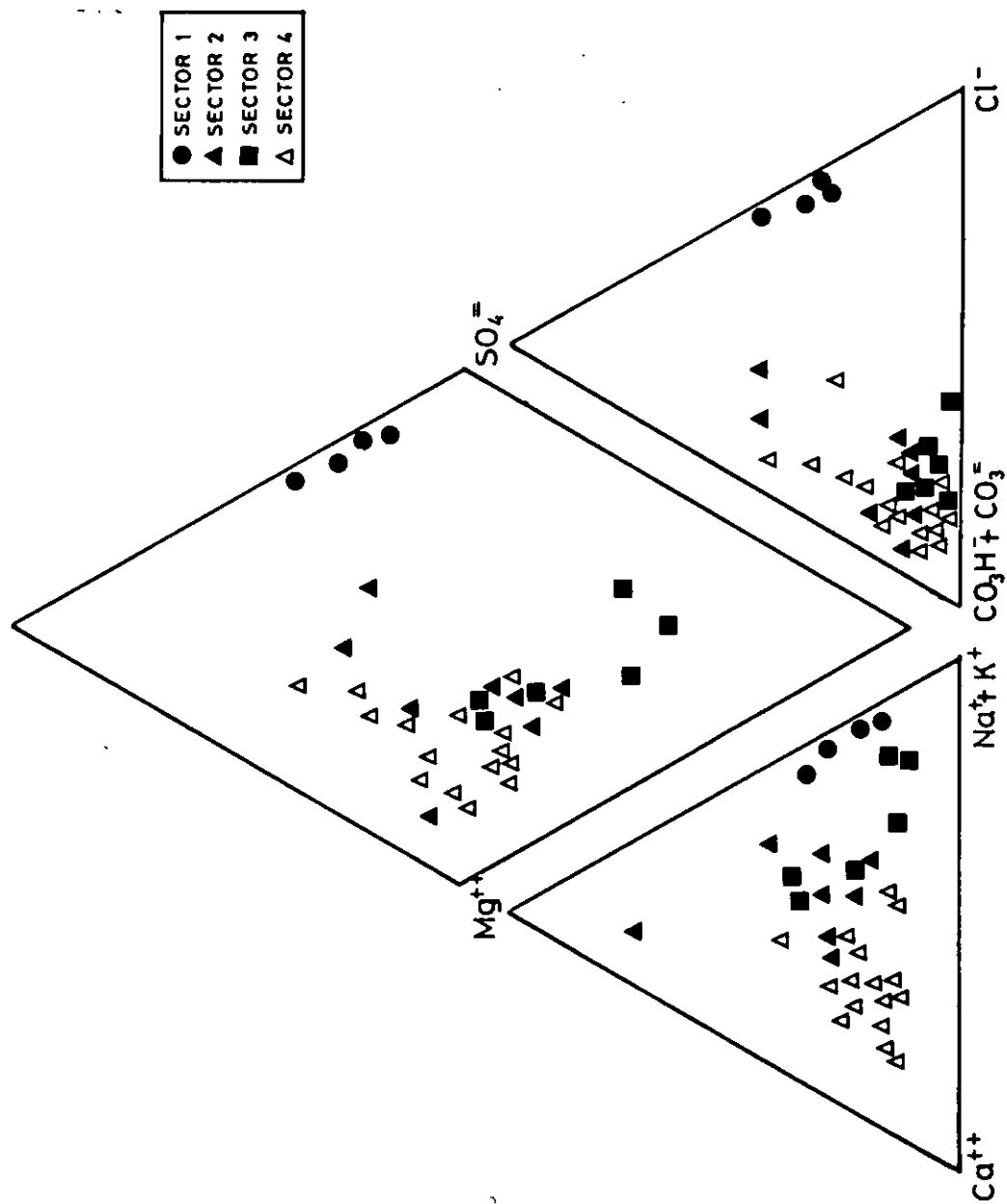


FIGURA 5.7. Diagrama de Piper, reflejando la composición iónica de las muestras de agua analizadas agrupadas por sectores ambientales.

TABLA 5.8. Estadísticos básicos de algunos parámetros con incidencia biológica medidos en las aguas de las formaciones palustres estudiadas en dos períodos de muestreo.

SECTOR 1				SECTOR 2			
n=4				n=8			
	RANGO	$\bar{X}$	$\sigma$	CV(%)	RANGO	$\bar{X}$	CV(%)
O2 disuelto (mg/l)	5.2-28	13.9	8.7	62.6	3-15.6	9.28	49.72
NO2= (µg-at/l)	0.009-0.07	0.02	0.02	127.9	0.009-0.05	0.02	81.98
NO3= (µg-at/l)	6.5-24.07	13.5	6.91	51.2	2.11-147.02	32.52	137.39
NH4+ (µg-at/l)	0.09-1.21	0.81	0.44	54.7	0.33-5.85	1.59	110.25
PO4= (µg-at/l)	0.07-4.60	1.29	1.90	147.9	0.15-6.03	1.8	101.90
Clorofila a (mg/m3)	6.67-22.5	13.8	5.9	42.8	6.85-888.3	148.27	191.80
Turbiedad (UN)	8.5-27.5	19	8.2	43.16	3.1-580	72.37	167.84

SECTOR 3				SECTOR 4			
n=6				n=16			
	RANGO	$\bar{X}$	$\sigma$	CV(%)	RANGO	$\bar{X}$	CV(%)
O2 disuelto (mg/l)	2.5-15.2	9.41	4.32	45.93	0.6-14.6	7.33	56.11
NO2= (µg-at/l)	0.004-0.089	0.027	0.028	107.10	0.003-0.039	0.03	89.31
NO3= (µg-at/l)	5.62-24.07	11.91	6.58	55.27	0.36-357.7	84.21	111.74
NH4+ (µg-at/l)	0.32-1.49	0.66	0.38	58.72	0.36-3.21	1.48	59.40
PO4= (µg-at/l)	0.01-4.59	1.80	1.69	94.07	0.32-8.1	3.21	62.80
Clorofila a (mg/m3)	2.17-31.52	12.87	9.45	73.44	6.18-115.22	31.05	101.82
Turbiedad (UN)	2.3-61	17.6	20.01	113.70	2.8-2000	587.7	121.90

cada sector en cuanto a su estado trófico y turbiedad.

A pesar de ello pueden detectarse ciertas tendencias generales con respecto a dichos parámetros.

Tanto el contenido en nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), como la clorofila "a" y la turbiedad medida en las lagunas, separa en dos grandes grupos a los sectores ambientales del acuífero.

De un lado, el sector 1 y 3 que hemos definido como de "descarga" de agua subterránea presenta lagunas con aguas relativamente transparentes (con valores medios de turbiedad de 19 y 17,6 U.N. respectivamente) y poco eutróficas si atendemos a los valores medios de  $\text{NO}_3^-$  y clorofila "a" (Tabla 5.8).

En los sectores ambientales donde la mayoría de las lagunas son de recarga (nº 2 y 4), éstas tienen aguas más turbias (72,37 y 587,7 U.N. respectivamente), así como valores mayores de  $\text{NO}_3^-$  y clorofila "a".

Para el resto de medidas químicas efectuadas, los valores medios de los distintos parámetros son muy semejantes en los cuatro sectores ambientales (Tabla 5.8).

#### **5.4.4. Origen de los iones mayoritarios disueltos en las aguas superficiales.**

Atendiendo a la fuente de origen de los iones disueltos en las aguas superficiales y sin considerar

los procesos que controlan su concentración, se puede afirmar que dichos iones proceden al menos de tres fuentes principales (Alberto et al., 1979; Kubly, 1982):

a) Atmosférica.

La composición del agua de lluvia, puede variar considerablemente tanto en el espacio como en el tiempo (Hem, 1989), dependiendo de las condiciones atmosféricas generales (regimen de vientos, presiones, etc.) y de factores locales como contaminación o tipo de terreno aflorante, del que procede las sales arrastradas por el viento (Wetzel, 1981).

En nuestro caso, el aporte iónico procedente de la lluvia es bajo, ya que la cuenca sedimentaria de Madrid, se encuentra muy alejada de la influencia marina y los materiales que la constituyen, no contienen cantidades importantes de partículas salinas fácilmente movilizables. En el Apéndice 5.4 figuran los resultados de los análisis de cuatro muestras de agua de lluvia. Se observa como la conductividad no supera los 82,6  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y la composición iónica varía desde bicarbonatado-cálcica a sulfatado-cálcica según lo esperado para regiones interiores, alejadas del mar (Matveyev & Bashmakova, 1967).

b) Lavado superficial del suelo y de las rocas.

El tipo de rocas y suelos, influirá de forma decisiva en el aporte de iones al agua de escorrentía (Wetzel, 1981).

En el territorio ocupado por el acuífero de Madrid, los materiales detríticos que lo constituyen (arenas y gravas fundamentalmente) contienen gran cantidad de materiales solubles, que sólo se liberan si el tiempo de disolución es prolongado (Custodio & Llamas, 1983). De forma general, el contenido mineral del agua de escorrentía de la zona de estudio no es demasiado elevado; así lo avalan los análisis efectuados en dos charcos de lluvia efímeros, inmediatamente después de la precipitación (Apéndice 5.4) que no presentan diferencias notables con los valores obtenidos a partir de los datos de lluvia.

**c) Aporte de agua subterránea en áreas de descarga.**

Los principales procesos y reacciones químicas que se producen en la composición y concentración mineralógica del agua que se infiltra en el terreno se resumen en la Figura 5.8. De todos ellos, los que tienen mayor importancia en los terrenos arcósicos del área de estudio, son el intercambio iónico (también llamado cambio de bases, ver Custodio & Llamas, 1983; Freeze & Cherry, 1979) y la hidrólisis de silicatos (Rubio, 1984), cuyas concentraciones disminuyen desde zonas de descarga a zonas de recarga de agua subterránea (Moreno Guerra & López Vera, 1979).

Dependiendo de los procesos mayoritarios que se desarrollan en las aguas subterráneas, debido fundamentalmente al tipo de materiales y al tiempo de residencia del agua en el subsuelo, la descarga de éstas puede llegar a ser una fuente de iones en las aguas de ciertos humedales.

Para conocer el grado de influencia que el agua subterránea del acuífero de Madrid tiene sobre las formaciones palustres, se ha calculado la interrelación entre la composición y concentración iónica del agua de las lagunas y de los pozos próximos, mediante un Análisis de Correlaciones Canónicas.

Se incluyeron en ambos grupos de variables, los valores de conductividad y salinidad, pH e iones mayoritarios. Sin embargo no fue posible incluir el  $\text{SiO}_2$  ya que esta medida se efectuó muy rara vez en los pozos recopilados para este trabajo (Apéndice 5.3).

En todos los casos, los datos sufrieron una transformación previa para que presentaran una distribución normal (ver apartado 5.2.2).

Se realizó un Análisis de Correlaciones Canónicas para cada uno de los grupos de lagunas que se detallan a continuación:

- Todas las muestras analizadas en el área de estudio (n=34).
- Muestras pertenecientes a sectores de recarga, esto es, sector 2 y 4, exceptuando las correspondientes a Aguajil y Navazarza por estar presumiblemente influenciadas por las las descargas locales del acuífero (n=10).
- Muestras pertenecientes a sectores de descarga (1 y 3), además de las dos lagunas excluidas en el grupo anterior (n=14).

Los resultados obtenidos (Tabla 5.9), fueron



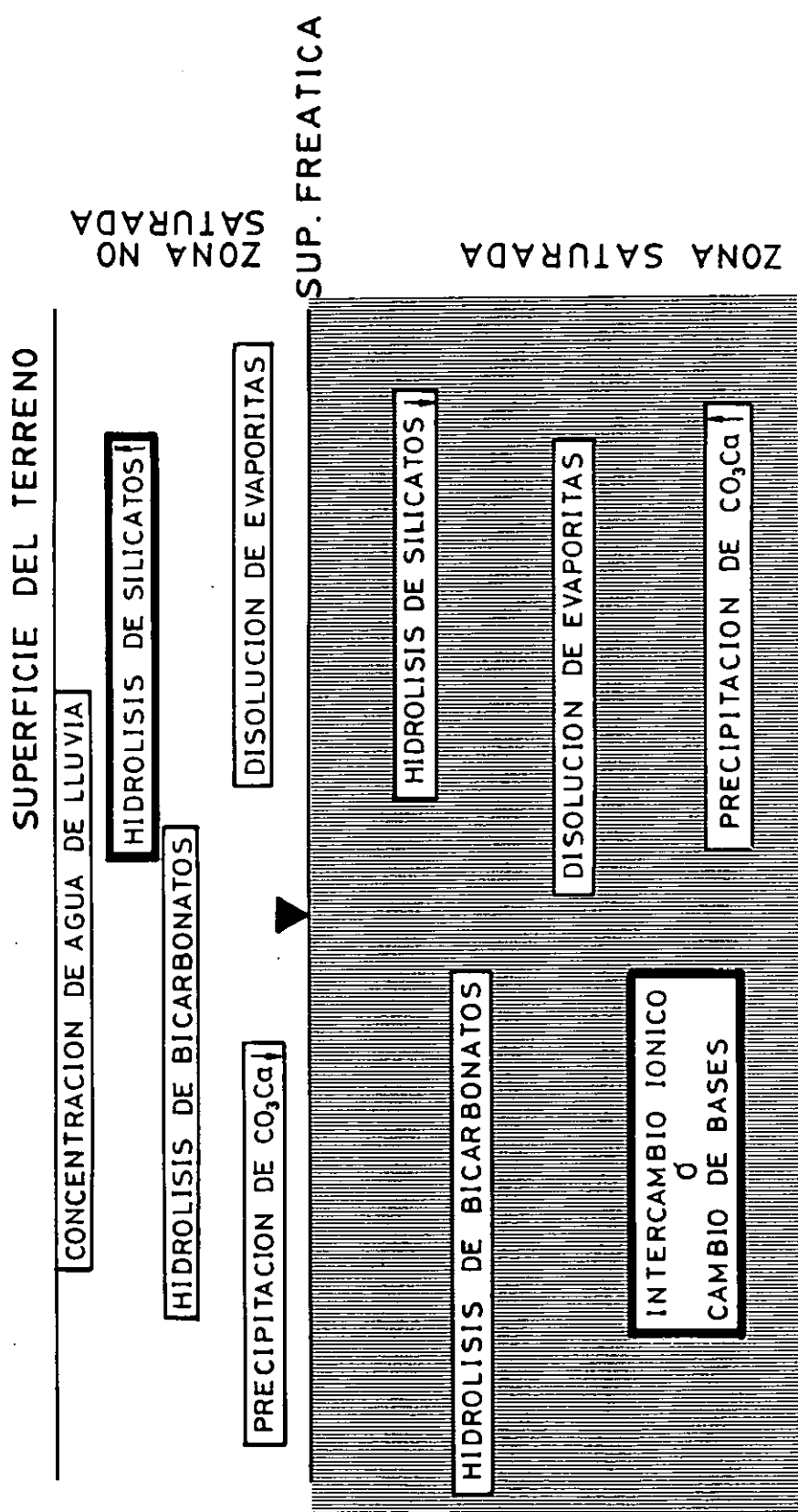


FIGURA 5.8. Procesos y reacciones químicas que tienen lugar en el agua que se infiltra en un terreno de naturaleza arcósica (Modificado de Rubio, 1984).

**TABLA 5.9. Coeficientes de las Correlaciones Canónicas encontrados entre las variables químicas de las lagunas y las de los pozos próximos. Se presentan los valores de las variables canónicas correspondientes a los parámetros del primer y segundo grupo considerados para todas las lagunas (\* n=34), para las lagunas de sectores ambientales de recarga (\*\* n=20) y para las lagunas de sectores ambientales de descarga (\*\*\*) n=14).**

	VARIABLES CANONICAS					
	1			2		
GRUPO 1 DE VARIABLES	Coeficientes de las variables canónicas					
	*	**	***	*	**	***
CONDUCTIVIDAD (LAG)	-0.617	0.302	-0.884	-0.476	-0.333	-0.320
pH (LAG)	0.635	-0.357	0.694	0.625	0.523	0.051
Ca++ (LAG)	-0.489	0.556	-0.535	-0.421	-0.266	-0.536
Na+ (LAG)	-0.848	-0.374	-0.947	-0.205	-0.442	-0.099
Mg++ (LAG)	-0.556	0.222	-0.846	-0.635	-0.294	-0.337
Cl- (LAG)	-0.694	0.220	-0.925	-0.466	-0.173	-0.120
ALCALINIDAD (LAG)	0.802	-0.235	0.196	0.286	0.434	-0.329
SO4= (LAG)	-0.341	0.216	-0.856	-0.672	-0.114	-0.346
K+ (LAG)	0.399	0.181	-0.370	-0.216	0.072	-0.639
SALINIDAD (LAG)	-0.655	0.332	-0.868	-0.504	-0.320	-0.339

	1			2		
GRUPO 2 DE VARIABLES	Coeficientes de las variables canónicas					
	*	**	***	*	**	***
CONDUCTIVIDAD (POZ)	-0.359	-0.126	-0.824	-0.455	-0.821	-0.442
pH (POZ)	0.356	0.780	0.257	-0.286	0.277	-0.939
Ca++ (POZ)	0.173	-0.444	-0.619	-0.648	-0.737	-0.710
Na+ (POZ)	-0.380	-0.073	-0.935	-0.504	-0.934	-0.025
Mg++ (POZ)	-0.021	-0.122	-0.654	-0.649	-0.917	-0.707
Cl- (POZ)	-0.270	0.261	-0.733	-0.447	-0.952	-0.476
ALCALINIDAD (POZ)	0.246	0.527	0.870	0.341	0.668	-0.222
SO4= (POZ)	-0.174	0.071	-0.847	-0.556	-0.959	-0.351
K+ (POZ)	0.176	0.126	0.749	0.591	0.684	-0.592
SALINIDAD (POZ)	-0.356	-0.289	-0.852	-0.453	-0.853	-0.444

	VALORES PROPIOS					
	*	**	***	*	**	***
	0.950	0.947	0.998	0.830	0.696	0.994
Coeficiente de la correlación canónica	0.974	0.973	0.999	0.911	0.834	0.997
X2	123.96	19.73	80.71	83.12	8.40	44.78
Grados de libertad	72	27	36	56	16	24
Significación	p≤0.005	0.1≤p≤0.5	p≤0.005	p≤0.005	0.1≤p≤0.5	0.005≤p≤0.01

sometidos al test de Bartlett's ( $p \leq 0.01$ ) para conocer las variables canónicas con coeficientes de correlación significativos. Estas resultaron ser las variables canónica 1 y 2 del análisis de todas las muestras y del que consideró sólo las lagunas de sectores ambientales de descarga.

Este hecho, hace pensar que la correlación entre el agua subterránea y las lagunas de sectores de recarga es prácticamente nula al no aparecer ninguna variable canónica como significativa en el análisis realizado.

De los dos grupos de lagunas restantes, son sin duda las pertenecientes a sectores de descarga las que manifiestan mayor relación en su salinidad y composición iónica con las aguas subterráneas.

#### **5.4.5. Tipos de formaciones palustres en función de sus características físico-químicas.**

En un primer paso del examen de los parámetros físico-químicos de las lagunas del acuífero de Madrid se consideraron por separado aquellas variables que se refieren a la concentración y composición iónica de las aguas, de aquellas otras que inciden en el estado trófico y de la turbiedad.

Para detectar tendencias conjuntas de variación en el grado y tipo de mineralización de las aguas superficiales, que puedan en último término diferenciar tipos diferentes de lagunas, se realizó un Análisis de

Componentes Principales sobre la matriz definida por los valores de conductividad, salinidad, pH e iones mayoritarios, de las 34 muestras de agua analizadas en esta fase del estudio. Los dos primeros ejes del análisis absorbieron el 88,50% de la variación total (Tabla 5.10).

Mientras que el eje I (74,63 % de varianza absorbida) posee un significado de mineralización global, el eje II con el 13,87% de variación explicada, queda definido por la alcalinidad. La representación de las muestras en el espacio definido por estos ejes (Figura 5.9) diferencia tres grupos de lagunas: las pertenecientes al sector de descarga regional de salinidad mayor, las del grupo de descarga intermedia, claramente alcalinas y el resto, más indiferenciadas, al que pertenecen las lagunas del sector de rañas y del sector de descarga local-recarga regional.

A partir de este análisis, se calculó la composición iónica típica de muestras con mayor afinidad por cada eje, así como algunos índices iónicos según la metodología propuesta por González Bernaldez et al. (enviado). Para ello, se tomaron los valores medios de las observaciones con valores de las coordenadas mayores de 0,25 para cada componente del análisis (Tabla 5.11).

De los índices iónicos calculados, los que más discriminan los dos factores son  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Cl}^-/\text{Alcalinidad total}$ . Ambos índices representados en función de la salinidad (g/l) (Figura 5.10) ponen de manifiesto la existencia de tres grupos de lagunas diferenciadas entre sí por el contenido total en sales y por la composición iónica de las mismas: hiposalinas

**TABLA 5.10. Factores de carga rotados del Análisis de Componentes Principales aplicado a los valores de conductividad, salinidad, pH e iones mayoritarios de las muestras químicas de las lagunas del acuífero de Madrid (n=34).**

	FACTOR I	FACTOR II	
SO4=	0.982	0.000	
Cl-	0.977	0.000	
Na+	0.971	0.000	
Salinidad	0.969	0.000	
Conductividad	0.969	0.000	
Mg++	0.950	0.000	
Ca++	0.809	0.514	
SiO2	0.757	0.000	
K+	0.742	0.000	
Alcalinidad total	0.000	0.963	
pH	0.389	0.854	
VARIANZA EXPLICADA (%)	74.63	13.87	TOTAL 88.50

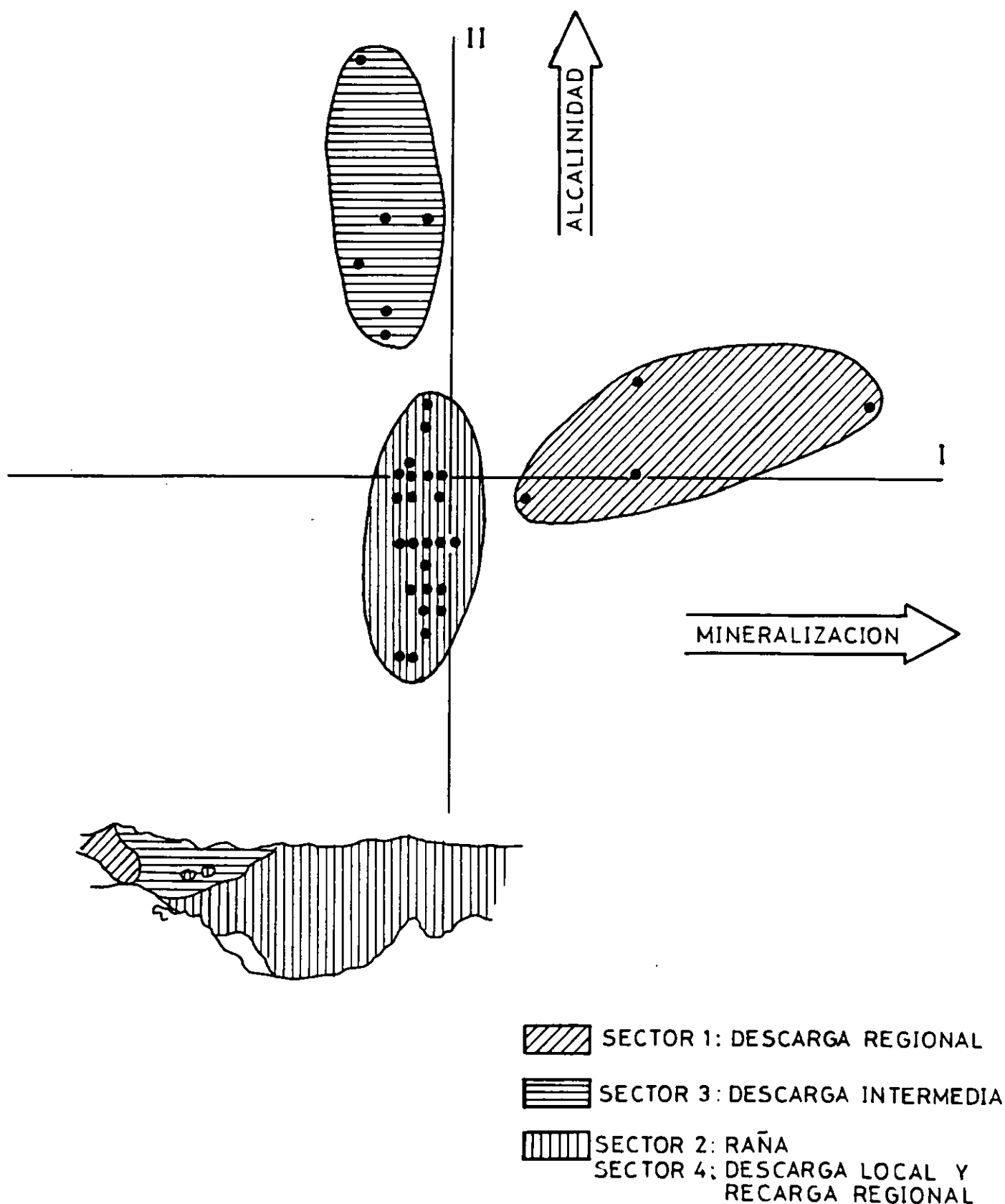


FIGURA 5.9. Representación del espacio definido por los dos primeros ejes del Análisis de Componentes Principales efectuado sobre un total de 34 muestras de agua de las formaciones palustres del acuífero de Madrid.

**TABLA 5.11. Valores típicos de iones mayoritarios e índices iónicos con mayor afinidad por cada eje del análisis en Componentes Principales entre muestras químicas de los humedales del acuífero de Madrid**

	FACTOR I	FACTOR II
SO <sub>4</sub> = (meq/l)	62.15	18.00
Cl <sup>-</sup> (meq/l)	118.9	39.59
Na <sup>+</sup> (meq/l)	127.25	43.19
Salinidad (g/l)	11.08	4.03
Conductividad (µS/cm)	14947.5	5307.9
Mg <sup>++</sup> (meq/l)	45.87	14.82
Ca <sup>++</sup> (meq/l)	7.17	4.75
SiO <sub>2</sub> (mg/l)	11.36	23.58
K <sup>+</sup> (meq/l)	0.609	0.41
Alcalinidad (meq/l)	3.92	8.00
pH	7.75	7.74
Na+K/Ca+Mg	2.41	2.22
Na/Ca	17.74	9.09
Cl/SO <sub>4</sub>	1.91	2.19
Ca/Mg	0.15	0.06
Cl/Alcal.	30.33	4.94

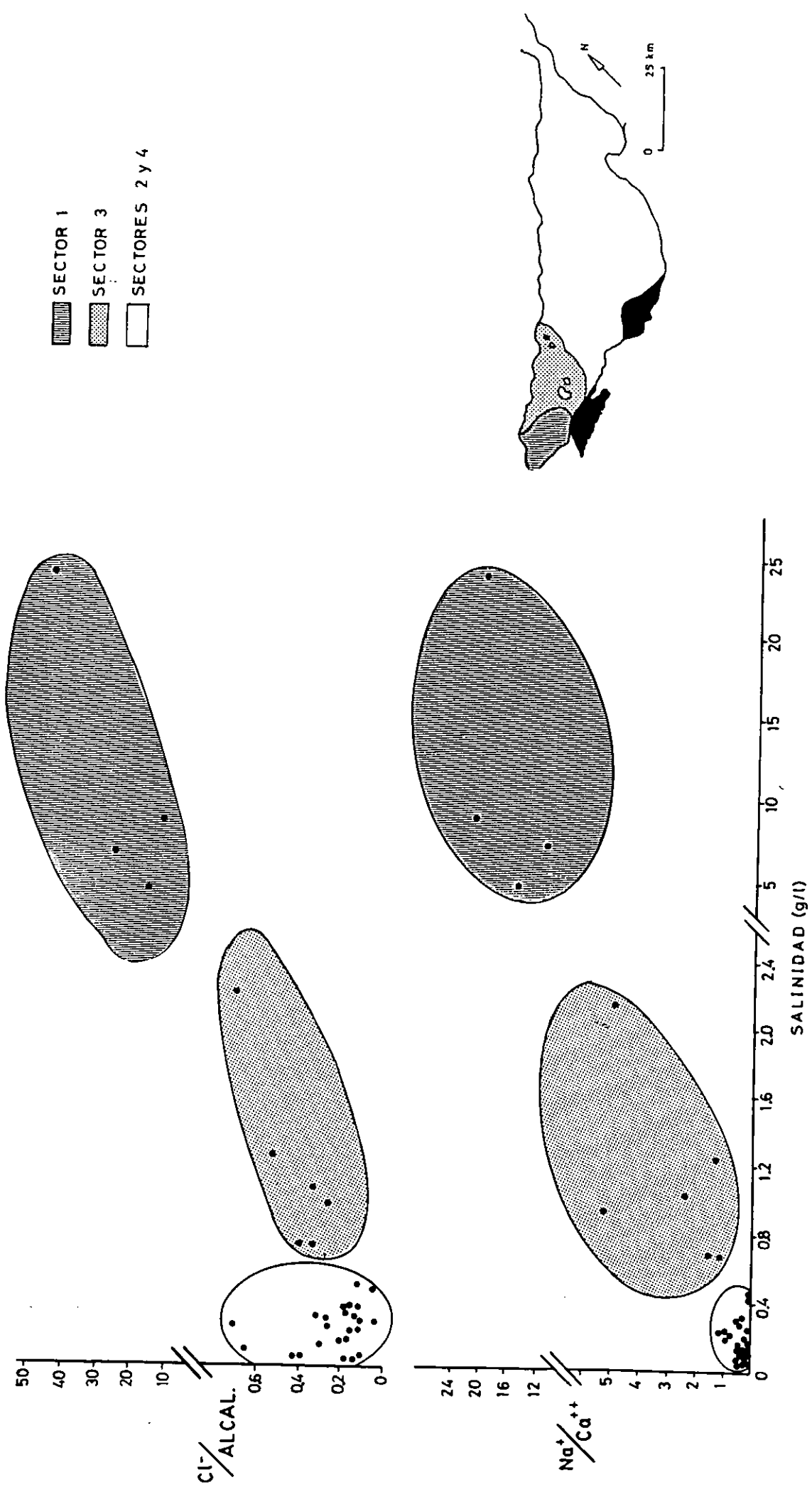


FIGURA 5.10. Representación de los índices iónicos  $\text{Cl}^-/\text{Alcalinidad}$  y  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++}$  en función de la salinidad (g/l) para las 34 muestras analizadas en las formaciones palustres del acuífero de Madrid.



clorurado sódicas (sector 1), subsalinas bicarbonatado sódicas (sector 3) y dulces bicarbonatado cálcicas (sectores 2 y 4).

Los dos primeros tipos son claras manifestaciones en superficie del fenómeno de evolución geoquímica, que sufre el agua subterránea en el acuífero de Madrid en flujos de medio y largo recorrido.

El aumento progresivo de la salinidad, así como el de los índices  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Cl}^-/\text{Alcalinidad}$ , se produce en el agua subterránea típicamente desde áreas de recarga a descarga (Custodio & Llamas, 1983; Toth, 1984), debido fundamentalmente a procesos de cambio iónico consistentes en que ciertos materiales, especialmente arcillas tienen la capacidad de cambiar sus iones absorbidos por moléculas de agua. El más típico de ellos, es el cambio de  $\text{Na}^+$  por  $\text{Ca}^{++}$  y/o  $\text{Mg}^{++}$  en la roca, de forma que el agua se enriquece en  $\text{Na}^+$  (Toth, 1984).

Los valores hidroquímicos de las lagunas perteneciente a los sectores 2 y 4 fueron sometidos a un segundo Análisis de Componentes Principales con el objeto de encontrar otras tendencias diferenciadoras que fragmenten el grupo (Tabla 5.12).

El eje I, con un 50,73% de la varianza explicada, queda definido por la mineralización global, unido a su mayor contenido alcalino, mientras que el eje II que absorbe el 19,57% de la variación total, diferencia lagunas con valores altos de  $\text{ClNa}$  y  $\text{SiO}_2$ .

La representación de las muestras en el espacio definido por dichos ejes (Figura 5.11) diferencia un grupo de lagunas pertenecientes al sector 4 que pueden

considerarse de descarga local a la vista de sus altos contenidos en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  disuelto.

El proceso de hidrólisis de  $\text{SiO}_2$  que tiene especial importancia en el acuífero de Madrid (Moreno Guerra & López Vera, 1979; Rubio, 1984) se produce en las primeras fases de la infiltración posiblemente durante el tránsito por la zona no saturada (Rubio, 1984; Toth, 1984), con lo que serán únicamente los humedales alimentados por flujos de agua subterránea de corto recorrido (locales) lo que posean valores altos de  $\text{SiO}_2$ .

En flujos de mayor recorrido, el  $\text{SiO}_2$  disuelto en el agua subterránea va disminuyendo progresivamente por neoformación de arcillas (Rubio, 1984), por lo que humedales de descarga intermedia o regional tendrán bajos valores para este elemento.

De igual forma, lagunas influídas mayoritariamente por agua de lluvia, también tendrán mínimos contenidos en  $\text{SiO}_2$ .

La verificación de estas diferencias a través del  $\text{SiO}_2$  disuelto se realizó mediante un Análisis de Varianza para las siguientes agrupaciones de lagunas de los sectores ambientales 2 y 4 (Tabla 5.13):

- lagunas del sector 2 (raña), lagunas de descarga local del sector 4 y lagunas de recarga regional del sector 4.
- lagunas de descarga local del sector 4 y lagunas de recarga regional del mismo sector.

**TABLA 5.12. Factores de carga rotados del Análisis en Componentes Principales efectuado con los iones mayoritarios de las muestras químicas de las lagunas de los sectores ambientales 2 y 4 del acuífero de Madrid (n=24)**

	FACTOR I	FACTOR II	FACTOR III	
Ca++	0.932	0.000	0.000	
Alcalinidad	0.896	0.380	0.000	
Salinidad	0.872	0.394	0.262	
Conductividad	0.863	0.325	0.333	
pH	0.760	0.000	0.000	
Na+	0.000	0.945	0.000	
Cl-	0.000	0.775	0.400	
SiO <sub>2</sub>	0.325	0.733	-0.351	
K+	0.000	-0.304	0.823	
SO <sub>4</sub> =	0.000	0.000	0.761	
Mg++	0.378	0.000	0.633	
VARIANZA EXPLICADA (%)	50.73	19.87	10.38	TOTAL 80.98

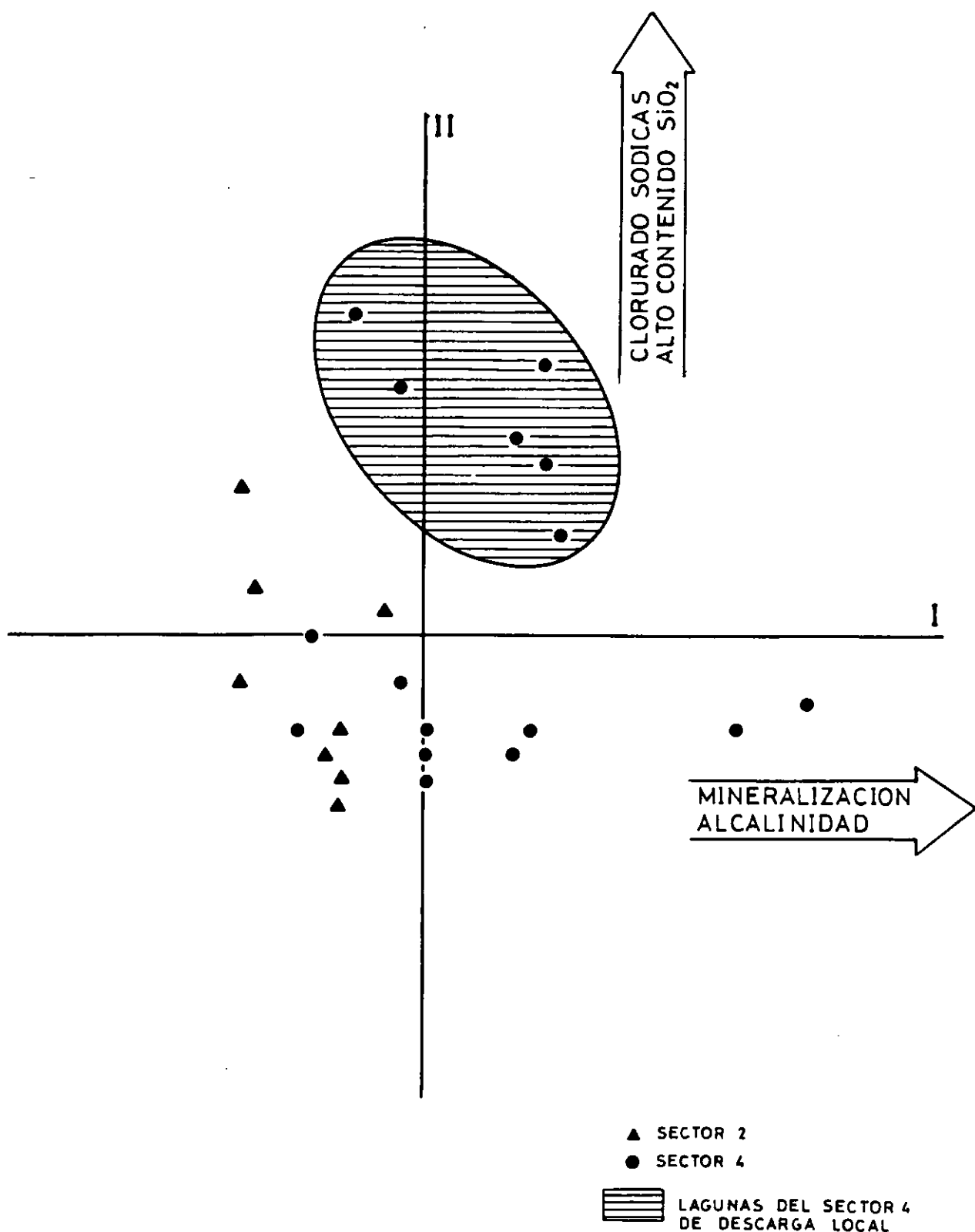


FIGURA 5.11. Representación del espacio definido por los dos primeros ejes del Análisis de Componentes Principales efectuado sobre un total de 24 muestras de agua pertenecientes a los sectores ambientales 2 y 4 del acuífero de Madrid.

**TABLA 5.13. Resultados del Análisis de Varianza efectuado con los valores de SiO<sub>2</sub> de las lagunas pertenecientes a los sectores ambientales 2 y 4.**

GRUPOS DE LAGUNAS CONSIDERADOS	F	g.l.	
		INTERGRUPO	INTRAGRUPPO
A + B + C	3.141**	1	16
B + C	15.02 *	2	17
A + C	1.73 **	2	19

\*  $\alpha$  0.05  
 \*\* No significativo

A = Lagunas pertenecientes al sector ambiental 2  
 B = Lagunas de descarga local pertenecientes al sector 4  
 C = Lagunas de recarga regional pertenecientes al sector 4

- lagunas del sector 2 (raña) y lagunas de recarga regional del sector 4.

Los resultados ponen en evidencia que unicamente existen diferencias significativas con respecto al contenido en  $\text{SiO}_2$  para las lagunas del sector ambiental 4: descarga local con altos valores de dicho elemento y recarga regional con contenidos menores.

El análisis de la información aportada por nutrientes, turbiedad, oxígeno disuelto y clorofila "a" para la delimitación de tipos, se realizó mediante un Análisis de Componentes Principales, donde los dos primeros ejes obtenidos absorben el 48,25% de la varianza total (Tabla 5.14). La representación de las muestras en el espacio definido por el eje I que tiene un sentido fundamental de turbiedad y por el eje II con significado de eutrofia (Figura 5.12) distingue un grupo de lagunas, pertenecientes al sector ambiental 4 con aguas muy turbias. Se trata de la mayor parte de las formaciones palustres de dicho sector que venimos considerando de recarga regional.

Uno de los hechos más importantes que se derivan de estos resultados, es que es posible mediante la turbiedad distinguir los dos grupos de lagunas de recarga del acuífero: lagunas situadas sobre rañas (sector 2) poco turbias, frente a lagunas situadas sobre formaciones arenosas (sector 4) con valores de turbiedad mucho más elevados.

Una posible explicación para estas diferencias entre los dos grupos de lagunas puede ser que la mayor movilidad de las arenas frente a los terrenos más arcillosos, impide la colonización de las cubetas en

períodos de sequía por parte de plantas terrestres que en definitiva compactan más el sustrato.

Estas diferencias resultan significativas estadísticamente a la vista de los resultados obtenidos del Análisis de Varianza realizado para este parámetro físico para diferentes agrupaciones de lagunas de los sectores ambientales 2 y 4 (Tabla 5.15).

Las tendencias generales observadas hasta aquí, permiten configurar 5 tipos físico-químicos de formaciones palustres. En la Figura 5.13 se observa como cada sector ambiental presenta un único tipo físico-químico, excepto el área perteneciente al sector 4, donde coexisten dos tipos de formaciones palustres (FQ4 y FQ5) diferenciados por la turbiedad de sus aguas y por el contenido en silicatos. A través de estas dos características se diferencian aquellas lagunas más influenciadas por flujos locales de agua subterránea (Aguajil y Navazarza) del resto de formaciones palustres más turbias y con menor concentración de silicatos, más relacionadas con las condiciones hidrometeorológicas.

A continuación se detallan las características que definen cada tipo, así como las lagunas que lo conforman y el sector ambiental al que pertenecen:

**- Tipo físico-químico 1 (FQ1).**

Lagunas muy mineralizadas, con alto contenido en  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , debido a la evolución geoquímica sufrida por el agua subterránea que descarga en sus cubetas. Bajos contenidos en  $\text{SiO}_2$  y en general aguas poco turbias.

**TABLA 5.14. Factores de carga rotados del Análisis de Componentes Principales aplicado a variables físicas y nutrientes de las lagunas del acuífero de Madrid(n=34)**

	FACTOR I	FACTOR II
TURBIEDAD	0.845	0.000
NO3=	0.628	0.000
CLOROFILA "a"	0.000	0.819
PO4=	0.317	0.616
NH4+	0.399	0.508
O2 DISUELTO	0.000	0.000
NO2=	0.547	0.000
VARIANZA EXPLICADA	25.08%	23.17%



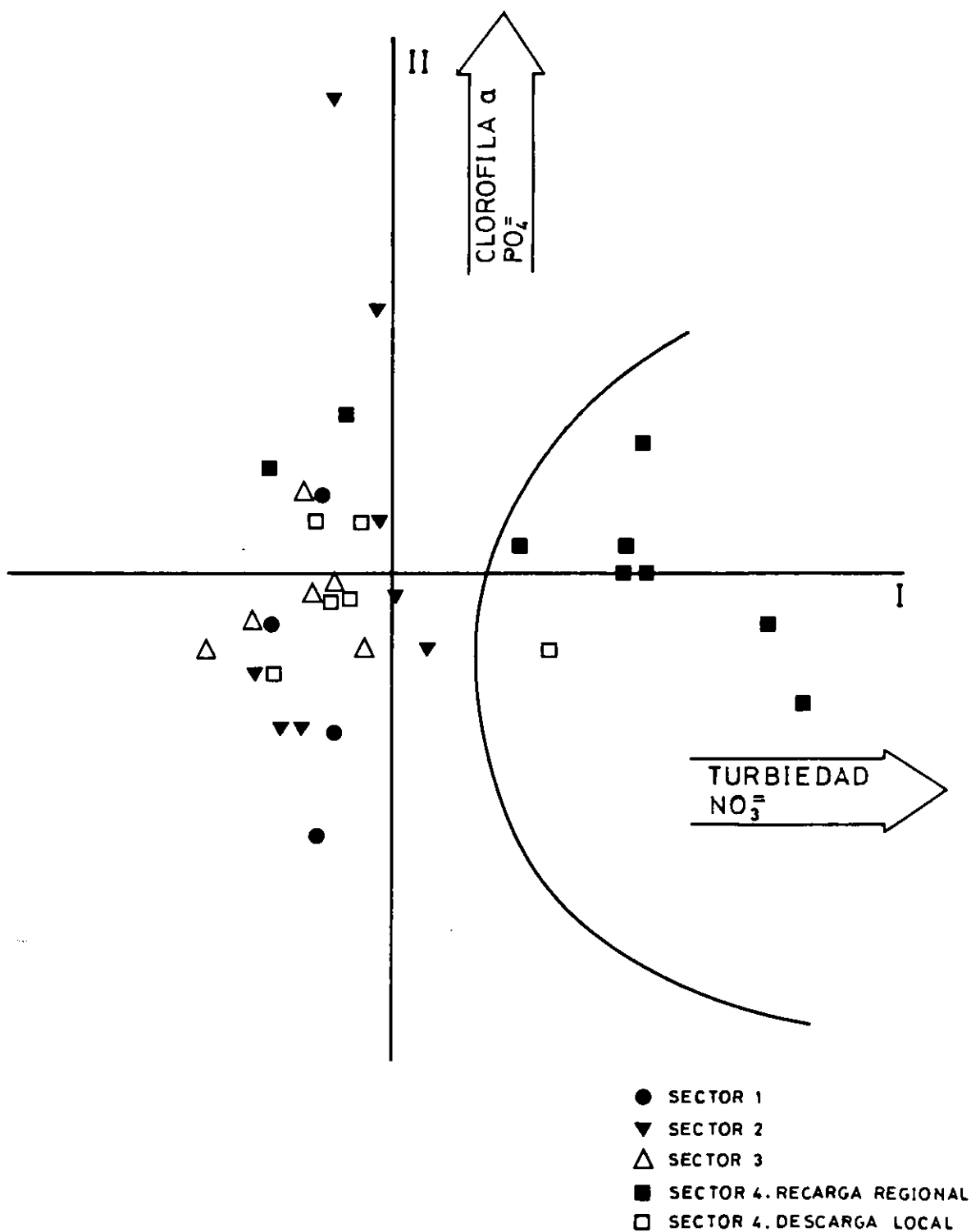


FIGURA 5.12. Representación del espacio definido por los dos primeros ejes del Análisis de Componentes Principales efectuado sobre los análisis de nutrientes y otras variables limnológicas de las formaciones palustres del acuífero de Madrid.

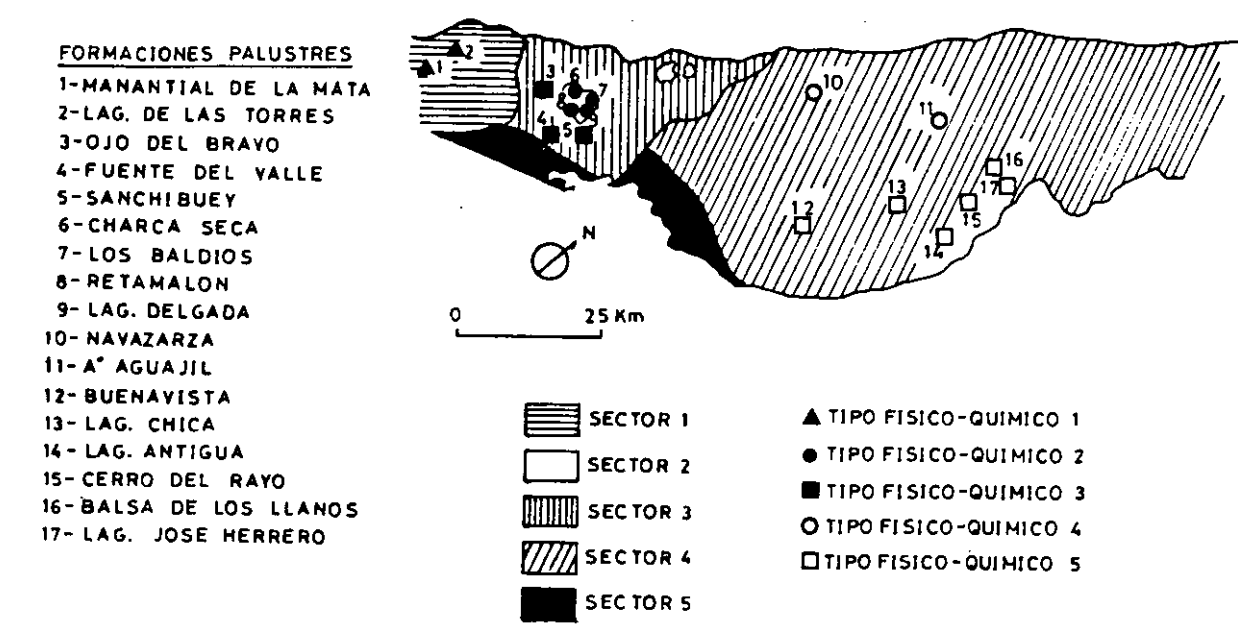
**TABLA 5.15. Resultados del Análisis de Varianza efectuado con los valores de turbiedad de las lagunas pertenecientes a los sectores ambientales 2 y 4**

GRUPOS DE LAGUNAS CONSIDERADOS	F	g.l.	
		INTERGRUPO	INTRAGRUPPO
A + B + C	5.957*	1	16
B + C	32.275*	2	17
A + C	5.108*	2	19

\*  $\alpha$  0.05

\*\* No significativo

A = Lagunas pertenecientes al sector ambiental 2  
 B = Lagunas de descarga local pertenecientes al sector ambiental 4  
 C = Lagunas de recarga regional pertenecientes al sector ambiental 4



	TIPOS				
	▲FQ1	●FQ2	■FQ3	○FQ4	□FQ5
MINERALIZACION (CONDUCTIVIDAD ELEC.) ( $\mu S/cm$ )	<div><del>34000</del></div>	<div>200</div>	<div>1300</div>	<div>300</div>	<div>300</div>
INDICE $Na^+/Ca^{++}$	<div>10</div>	<div>0.5</div>	<div>5</div>	<div>0.5</div>	<div>0.5</div>
INDICE $Cl/Alcal.$	<div><del>25</del></div>	<div>0.5</div>	<div>0.5</div>	<div>0.5</div>	<div>0.5</div>
$SiO_2$ (mg/l)	<div>10</div>	<div>10</div>	<div>30</div>	<div>40</div>	<div>10</div>
TURBIEDAD (U.N)	<div>20</div>	<div>70</div>	<div>20</div>	<div>10</div>	<div><del>600</del></div>

FIGURA 5.13. Características de los tipos físico-químicos de formaciones palustres del acuífero de Madrid (para explicaciones ver texto).

Pertenecen a este tipo todas las lagunas situadas sobre el sector ambiental 1 de descarga regional (Manantial de la Mata y Laguna de las Torres).

- Tipo físico-químico (FQ2).

Pertenecen a este tipo, un grupo de lagunas muy dulces, bicarbonatado cálcicas, y con valores de los índices iónicos  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Cl}^-/\text{Alcalinidad}$  bajos. Poco contenido en silicatos y generalmente agua más o menos transparentes.

Se trata de todas las lagunas situadas sobre los terrenos de raña del sector ambiental 2, influenciadas fundamentalmente por agua de lluvia (Charca Seca, Los Baldíos, Retamalón y Laguna Delgada).

- Tipo físico-químico 3 (FQ3).

Formaciones palustres con mineralización media y valores medios de los índices iónicos  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Cl}^-/\text{Alcalinidad}$ . Su composición iónica es bicarbonatada sódica, lo que manifiesta una clara entrada de agua subterránea de flujos de recorrido intermedio. Bajo contenido en  $\text{SiO}_2$  y aguas poco turbias.

Todas las lagunas del sector ambiental 3 (descarga intermedia) pertenecen a este tipo (ojo del Bravo, Fuente del Valle y Sanchibuey).

- Tipo físico-químico 4 (FQ4).

Lagunas poco mineralizadas, bicarbonatado cálcicas y con valores bajos de los índices iónicos  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Cl}^-/\text{Alcalinidad}$ . Alto contenido en silicatos, debido a la descarga en estas cubetas de agua subterránea que ha sufrido procesos de hidrólisis de este elemento al atravesar la zona no saturada del subsuelo. Aguas en general poco turbias.

Pertenecen a este tipo las lagunas de descarga local del sector ambiental 4 (Aguajil y Navazarza).

- Tipo físico-químico 5 (FQ5).

Este tipo tiene algunos rasgos comunes con los tipos FQ2 y FQ4 descritos arriba, esto es, aguas dulces, bicarbonatado cálcicas con valores bajos de los índices iónicos  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Cl}^-/\text{Alcalinidad}$ . Los elementos diferenciadores son un bajo contenido en silicatos y aguas muy turbias, como corresponde a formaciones palustres de recarga en terrenos arenosos.

Pertenecen a este tipo las lagunas de recarga regional del sector ambiental 4. (Buenavista, Laguna Chica, Laguna Antigua, Cerro del Rayo, Balsa de los Llanos y Laguna de José Herrero).

### **5.5. CARACTERIZACION BIOTICA EN RELACION CON LA ALIMENTACION HIDRICA PRINCIPAL.**

#### **5.5.1. Composición y estructura de bentos, meiobentos y macrófitos acuáticos.**

Para las formaciones palustres que conforman el patrimonio actual del área de estudio, se ha procedido a la identificación de determinados grupos de organismos, seleccionados por presentar una gran diversidad de especies con diferentes significados ecológicos.

En especial hay que destacar la fauna meiobentónica ya que como afirman Alonso & Comelles (1987) se compone de organismos muy comprometidos con el medio, lo que permite establecer buenas relaciones entre los tipos de hábitats y las especies, además de resultar buenos indicadores para realizar generalizaciones en el tiempo sobre todo cuando se trabaja, como en nuestro caso, con una sola muestra anual.

Los datos obtenidos se recogen en el Apéndice 5.5.

En cuanto a fauna de invertebrados acuáticos se refiere, en general, los crustaceos constituyen el grupo mayoritario en la composición biótica examinada, siendo los ostrácodos los que aparecen en prácticamente todas las lagunas muestreadas.

Entre los insectos, el orden Diptera también

resulta abundante en estos humedales, ya que aparece en 15 localidades, del total de 17 examinadas.

Hay que destacar que la riqueza de macrófitos acuáticos es muy baja en estos humedales, habiéndose encontrado únicamente 9 especies pertenecientes a 6 familias. Es frecuente, que dichas poblaciones aparezcan aisladamente en cada laguna, por lo que la mayoría de los casos no se puede hablar de comunidades de macrófitos acuáticos.

A partir de la aplicación del Análisis DECORANA a la matriz de presencia-ausencia de organismos, se caracterizaron grupos de lagunas con similitudes faunísticas y florísticas.

Los tres primeros ejes absorbieron el 29,8% de la variación total (eje I: 14%; eje II: 9,8%; eje III: 6%). Teniendo en cuenta que valores propios de los ejes mayores de 0,3 son comunes en aplicaciones ecológicas (Hill, 1979) se han considerado aquí únicamente los ejes I y II con valores de 0,64 y 0,45 respectivamente.

En la Figura 5.14 se presenta la disposición espacial de formaciones palustres y organismos, definida por los dos primeros ejes del análisis.

El eje I ordena los sectores ambientales del acuífero de Madrid con un claro criterio de mayor-menor salinidad de las aguas superficiales.

Las adaptaciones de los organismos acuáticos a diferentes grados de salinidad constituye un tema ampliamente tratado en la bibliografía (Gauthier, 1928; Beadle, 1943; Hartland-Rowe, 1966; Bayly, 1972;





Williams, 1981), distinguiéndose la existencia de tres tipos de mecanismos fisiológicos que regulan las relaciones osmóticas entre el medio interno de una determinada especie y el ambiente en que se desarrolla.

De esta forma, se distinguen especies tolerante que viven normalmente en agua dulces, aunque pueden tolerar salinidades medias, especies halófilas que se desarrollan en agua salinas, aunque pueden vivir en aguas más diluidas y por último, especies halobiontes que viven únicamente en agua muy mineralizadas.

Según esto, las lagunas pertenecientes al sector I de descarga regional, que se sitúan en uno de los extremos del eje I, agrupan a especies con afinidad por ambientes salinos.

De todas ellas, *Arctodiaptomus salinus* puede considerarse una especie halobionte según la terminología de Williams (1981).

Las especies de cladóceros *Simocephalus exspinosus*, *Dunhevedia crassa*, *Alona salina* y los copépodos *Arctodiaptomus wierzejskii* y *Cletocamptus retrogressus*, que aparecen en la laguna de las Torres y Manantial de la Mata, caracterizan humedales de agua mineralizada (Alonso, 1987). En este caso, se constata mayor contenido salino en la laguna de las Torres ya que presenta especies muy características, adaptadas a la rigurosidad de estos ambientes (Alonso, 1987).

Por otro lado, la presencia del macrófito acuático *Ruppia drepanensis* en estas dos lagunas, considerado como uno de los más representativos de las lagunas salinas españolas (Montes & Martino, 1987), confirma la

agrupación de estos humedales en el extremo del eje I del Análisis con significado de alta mineralización.

Las lagunas pertenecientes al sector ambiental 3 de descarga intermedia se sitúan en una posición intermedia del gradiente de salinidad del eje I. Sanchibuey y ojo del Bravo con aguas algo mineralizadas y alcalinas presentan como especie más característica el carófito *Chara vulgaris*, cuyo género es descrito como normalmente alcalinófilo (Comelles, 1985).

La menor homogeneidad de este grupo de lagunas, se debe posiblemente a las diferencias en el grado de permanencia de sus aguas. Aunque en los tres casos, se trata de lagunas con un ciclo hídrico prolongado, no hay que olvidar los aportes de aguas residuales que recibe la laguna de Fuente del Valle, que le confiere un carácter más permanente a sus aguas.

La presencia del copépodo *Acanthocyclops* sp, en esta última laguna evidencia el efecto de dicho vertido, al tratarse de un grupo de organismos característico de aguas eutrofizadas o contaminadas (Alonso, 1985).

Practicamente el resto de lagunas pertenecientes a los sectores ambientales 2 y 4 aparecen indiferenciadas con respecto a este primer factor del análisis: la presencia de especies como los macrófitos acuáticos *Ranunculus ololeucus*, *Callitriche brutia* y *Veronica anagallis-aquatica*, los crustaceos *Hemidiaptomus roubau*, *Neolovenula alluaudi*, *Mixodiaptomus incrassatus*, *Daphnia bolivari*, *Leydigia acanthocercoides*, *Triops cancriformis*, *Cyzicus grubei* y el heteróptero *Sigara lateralis*, denuncia las

características hidroquímicas de este grupo de lagunas, dulces y con un rango de turbiedad variable (Alonso, 1987). Aunque el rango de esta última variable es muy amplio (entre 3,1 y 2.000 U.N., ver Apéndice 5.2) no parece que este factor determine diferencias significativas en cuanto a sus especies dominantes se refiere, a pesar de ser mencionado como característica importante por Alonso (1987).


El eje II del análisis posee un claro significado de permanencia del agua en la cubeta.

Este factor posee una importancia determinante en la composición de la biocenosis (Alonso & Comelles, 1987).

Los ecosistemas palustres sometidos a periodos de sequía a lo largo de su ciclo anual o interanual, imponen a las especies colonizadoras la necesidad de desarrollar mecanismos para sobrevivir a estos periodos secos.

De todas las estrategias descritas (Beverconve et al., 1973; Thiery, 1978) quizá sea la producción de huevos durables la más extendida en grupos taxonómicos de agua temporales (Alonso y Comelles, 1987), asimismo, estos organismos alcanzan rápidamente la madurez sexual para aprovechar al máximo la fase húmeda, proceso que se puede ver acelerado por la temperatura y la salinidad (Williams, 1981).

En este sentido, todas las especies aparecidas en nuestro inventario poseen algún tipo de adaptación a la sequía, ya que de entre las formaciones palustres estudiadas, no hay ninguna que posea aguas permanentes.



Sin embargo, se pueden distinguir dos grupos de organismos: aquellos con mayor afinidad por ambientes de condiciones hídricas adversas y otros que no soportan cambios bruscos en las fluctuaciones del humedal y viven en ambientes semipermanentes.

En efecto, en uno de los extremos del gradiente mostrado por el eje II del análisis, se sitúan las lagunas que venimos denominando ojos (Aguajil, Navazarza, ojo del Bravo y Sanchibuey) más profundas y con un periodo hídrico más prolongado, con especies con gran afinidad por medios permanentes o semipermanentes (Alonso, 1987): *Megacyclops viridis*, *Cyclops* sp., *Daphnia obtusa*, *Simocephalus vetulus*, *Mixodiaptomus incrassatus*, *Ceriodaphnia quadrangula* y *Chydorus sphaericus*, los odonatos *Aeschna mixta*, *Ischnura pumilio*, *Lestes virens* y *Sympecma fusca*, el efemeróptero *Cloeon dipterum* y el heteróptero *Hesperocorixa* sp. Acompaña a este cuadro la vegetación acuática *Ranunculus peltatus*, *Veronica anagallis-aquatica*.

Las lagunas más inestables, se sitúan en el extremo opuesto del eje con especies adaptadas a periodos prolongados de sequía (*Macrothrix hirsuticornis*, *Triops cancriformis*, *Cycicus grubei* y *Chirocephalus* sp.)

En resumen, se observa como son las especies de crustáceos las que más intervienen en la ordenación de grupos de lagunas, sobre todo con respecto al factor salinidad, mientras que las lagunas más persistentes poseen un mayor número de especies de insectos.

### **5.5.2. Tipos de formaciones palustres en función de su biota acuática.**

A la vista de las tendencias observadas, se distinguen cuatro grupos de lagunas con comunidades de organismos característicos. En la Figura 5.15 se observa como únicamente las lagunas del sector 1 de descarga regional, mantienen un tipo de organismos acuáticos con afinidades por medios salinos y temporales bien diferente del resto de comunidades encontradas.

Por otro lado, la laguna de Fuente del Valle (perteneciente al sector ambiental 3) es el único humedal que mantiene el tipo biológico 3 por la aparición de especies de crustaceos resistente a aguas muy eutrofizadas.

Los ojos de Aguajil y Navazarza (del sector 4) y ojo del Bravo y Sanchibuey (del sector 3) se distinguen del resto de lagunas por la presencia de organismos característicos de aguas dulces o algo mineralizadas y permanentes o semipermanentes.

El resto de lagunas pertenecientes a los sectores ambientales 2, y 4 se asemejan entre sí presentando comunidades adaptadas a aguas dulces y temporales.

A continuación se describen con detalle las características de cada tipo mencionado:

- **Tipo biológico 1 (B1).**

Puede considerarse un tipo de gran consistencia, ya que agrupa a las dos lagunas pertenecientes al sector de descarga regional (nº 1) del área de estudio.

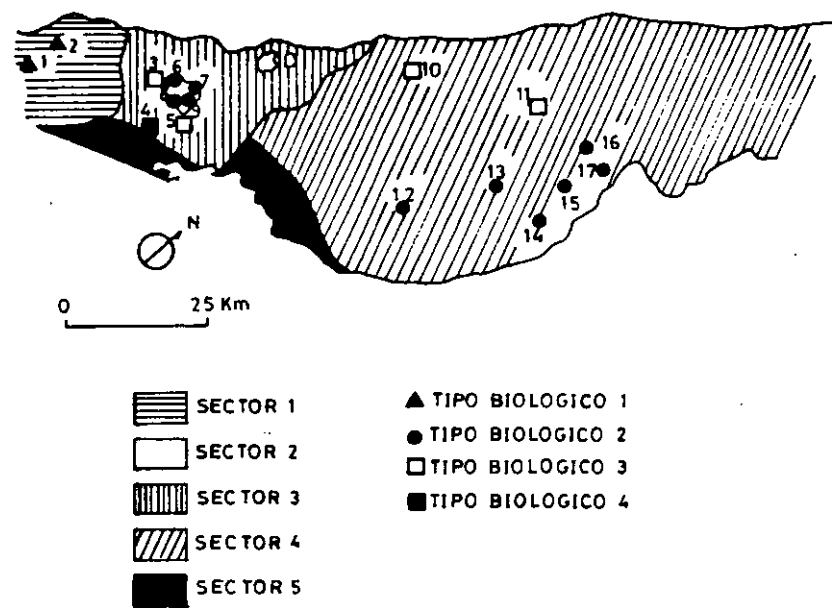
Las especies encontradas en Laguna de las Torres y Manantial de la Mata pertenecen a comunidades de tipo estepario de aguas mineralizadas y temporales, entre las que pueden citarse como más características *Arctodiaptomus wierjeskii*, *A. salinus*, *Cletocamptus retrogressus*, *Alona salina* y *Ruppia drepanensis*.

- **Tipo biológico 2 (B2).**

Las especies que conforman este tipo caracterizan aguas dulces o algo mineralizadas, temporales y algo turbias, tratándose en general de ambientes poco persistentes y con fluctuaciones apreciables del nivel de agua. Entre ellas pueden citarse como más típicas a *Metacyclops minutus*, *Alona azorica*, *Moina brachiata*, *Mixodiaptomus incrassatus*, *Cyzicus grubei*, *Chirocephalus* sp y *Triops cancriformis*.

Pertenecen a este tipo todas las lagunas del sector ambiental de rañas (Charca Seca, Los Baldíos, Retamalón y Laguna Delgada) y gran parte del sector 4, concretamente aquellas lagunas que se vienen perfilando como de origen meteórico (Buenavista, Laguna Chica, Laguna Antigua, Cerro del Rayo, Balsa de los Llanos y Laguna de José Herrero).

- FORMACIONES PALUSTRES**  
 1-MANANTIAL DE LA MATA  
 2-LAG. DE LAS TORRES  
 3-OJO DEL BRAVO  
 4-FUENTE DEL VALLE  
 5-SANCHIBUEY  
 6-CHARCA SECA  
 7-LOS BALDIOS  
 8-RETAMALON  
 9-LAG. DELGADA  
 10-NAYAZARZA  
 11-A° AGUAJIL  
 12-BUENAVISTA  
 13-LAG. CHICA  
 14-LAG. ANTIGUA  
 15-CERRO DEL RAYO  
 16-BALSA DE LOS LLANOS  
 17-LAG. JOSE HERRERO



	ESPECIES TIPICAS	AMBIENTES CARACTERISTICOS
▲B1	Arctodiaptomus wierzejskii A. salinus Cletocamptus retrogresus Alona salina Ruppia drepanensis	AGUAS MUY MINERALIZADAS Y TEMPORALES
●B2	Metacyclops minutus Alona azorica Moina brachiata Mixodiaptomus incrassatus Cizycus grubei Chirocephalus sp. Triops cancriformis	AGUAS DULCES O ALGO MINERALIZADAS, POCO PERSISTENTES
◻B3	Acanthocyclops sp. Lymnaea peregra Lymnaea truncatula	AGUAS EUTROFIZADAS O CONTAMINADAS, MAS O MENOS PERMANENTES. CARACTER ALCALINO
■B4	Simocephalus vetulus Daphnia obtusa Chydorus sphaericus Ischnura pumilio Lestes virens Sympecma fusca Cloeon dipterum Ranunculus sp. Veronica anagallis-aquatica	AMBIENTES MAS O MENOS PERMANENTES CON AGUAS DULCES O ALGO MINERALIZADAS

FIGURA 5.15. Especies características de los tipos biológicos encontrados para las formaciones palustres situadas sobre el acuífero de Madrid.

- Tipo biológico 3 (B3).

La presencia de *Acanthocyclops* sp en la laguna de Fuente del Valle perteneciente al sector 3 de descarga intermedia, denuncia la recepción de vertidos, como ya se comentó arriba.

La existencia de *Lymnaea peregra* y *L. truncatula* evidencia el carácter alcalino de estas aguas a pesar de los vertidos, lo que puede asemejarla a las otras lagunas del sector 3.

- Tipo biológico 4 (B4).

Formado por los ojos de Aguajil y Navazarza, pertenecientes al sector ambiental 4 e interpretados como de descarga local y los ojos del Bravo y Sanchibuey del sector 3. Poseen comunidades características de ambientes más o menos permanentes con cubetas tipo "ojos" y con aguas dulces o ligeramente mineralizadas y limpias.

Entre ellas cabe citarse los crustáceos *Cyclops* sp y *Daphnia obtusa*, *Simocephalus vetulus*, *Mixodiaptomus incrassatus*, *Ceriodaphnia quadrangula* y *Chydorus sphaericus*, los insectos *Aeschna mixta*, *Ischnura pumilio*, *Lestes virens*, *Sympecma fusca*, *Cloeon dipterum*, *Hesperocorixa* sp y *Ranunculus* sp y *Veronica* sp como vegetación acuática característica.

Hay que mencionar sin embargo, que la presencia de *Chara vulgaris* en los humedales del sector 3, denuncia cierta tendencia alcalina del agua.



### **5.6. PROPUESTA DE UNA CLASIFICACION GENETICO-FUNCIONAL DE FORMACIONES PALUSTRES.**

En función del origen y de las rutas seguidas por el agua que alimenta a las cubetas estudiadas se ha realizado una clasificación que permite explicar determinadas características observadas en las láminas de agua (permanencia y fluctuaciones de las aguas, turbiedad, morfometría, salinidad y composición iónica) que condiciona la estructura de las comunidades que forman su biota. Por otro lado, mediante esta clasificación es posible evaluar la validez de los sectores ambientales con sentido limnológico, propuesto en este trabajo.






En base a criterios genético-funcionales, las formaciones palustres del acuífero de Madrid, se han dividido en dos grandes grupos: aquellas cuyas cubetas se alimentan fundamentalmente de aguas superficiales "epigénicas" y aquellas en las que las aguas subterráneas forman una parte importante de su balance hidrológico anual "hipogénicas". Estos dos grupos a su vez se han subdividido en una serie de tipos limnológicos (Tabla 5.16) que se detallan a continuación:

#### **A) FORMACIONES PALUSTRES EPIGENICAS.**

##### **A.1. De recarga sobre arenas.**

Se refiere a charcas poco profundas que acumulan en sus cubetas aguas de origen meteórico y de escorrentía.

FIGURA 5.16. Características de cada tipo genético-funcional de formaciones palustres en el acuífero de Madrid y su relación con los flujos de agua subterránea.

TIPO	SECTOR AMBIENTAL	FLUJOS DE AGUA SUBTERRANEA	REGIMEN HIDROLOGICO	MORFOMETRIA	MINERALIZACION Y COMPOSICION IONICA	TURBIDEDAD	BIOTA	FORMACION PALUSTRE TIPICA
<b>A) EPICENICO</b>								
DE RECARGA (SOBRE ARENAS)	4	No conectadas con el acuífero regional	Aguas temporales, fluctuantes. Permanencia del agua: enero a junio	De formas redondeadas, con presencia de playa	Poco mineralizadas Na/Ca y Cl/alcal bajo. Bicarbonatado cálcicas. Bajo contenido en SiO <sub>2</sub>	Muy turbias	Cycicus grubei Chyrocephalus sp Triops cancriformis Alona azorica Moina brachiata Mixodiatomus incrassatus	
DE CUBETA IMPERMEABLE (SOBRE RANAS)	2	Acuíferos colgados, independientes del regional				Poco turbias		
<b>B) HIPOCENICO</b>								
DE FLUJOS CORTOS	4	Flujos locales de agua subter. Acuífero regional		De formas redondeadas profundas, sin playa. Tipo "ojos"	Poco mineralizadas Na/Ca y Cl/alcal bajos. Bicarbonatado cálcicas. Alto SiO <sub>2</sub>	Poco turbias	Daphnia obtusa Aeschna mixta Ischnura pumilio Lestes viridis Ranunculus sp	
DE FLUJOS REGIONALES ALCALINOS	3	Flujos intermedios de agua subter. Acuífero regional	Aguas temporales. Menos fluctuantes. Permanencia del agua: octubre a mayo/junio		Mineralizac. media Na/Ca y Cl/alcal medio. Bicarbonatado sódicas. Bajo SiO <sub>2</sub>	Poco turbias	Bythotrephes cederstroemi Bythotrephes truncatula Simocephalus vetulus Chydorus sphaericus Chara vulgaris	
DE FLUJOS REGIONALES MIXTOS	1	Flujos regionales de agua subter. Acuífero regional		Formas irregulares, con someras, con playa.	Mineralizac. alta Na/Ca y Cl/alcal altos. Bajo SiO <sub>2</sub>	Poco turbias	Cletocamptus retrogrediens Arctodiaptomus salinus Arctodiaptomus wierzejskii Alona salina Ruppia drepanensis	

Su relación con la descarga de aguas subterráneas es mínima, siendo claramente recarga del acuífero. Se sitúan en las regiones más elevadas del área de estudio (sector ambiental 4). Sus cubetas suelen ser redondeadas con una razón superficie/volumen de agua muy alta, confiriéndole un marcado carácter temporal. El llenado y vaciado de sus cubetas es muy rápido y las fluctuaciones del nivel de sus aguas están intimamente ligadas al balance estacional precipitación-evaporación.

Sus cubetas suelen ser ricas en elementos finos mezclados con arenas de tamaño mayor, por lo que durante el periodo de inundación el agua posee una elevada turbiedad debida a la presencia de materiales inorgánicos en suspensión.

Las aguas que mantienen son dulces, de carácter ácido o neutro, siendo el bicarbonato y el calcio los iones mayoritarios.

Entre las especies características encontradas en estos ambientes pueden citarse a los crustaceos *Alona azorica*, *Moina brachiata*, *Cyzicus grubei*, *Chirocephalus* sp y *Triops cancriformis*.

Las charcas del área de estudio que pertenecen a este tipo funcional son Laguna Antigua, Buenavista, Laguna Chica, Cerro del Rayo, Balsa de los Llanos y Laguna de José Herrero.

#### A.2. De cubeta impermeable sobre rañas.

Comparten la mayoría de las características

descritas para el tipo epigénico situado sobre arenas, aunque en este caso la recarga del acuífero regional sea mínima debido a la existencia en los terrenos de raña (sector 2) de acuíferos colgados, independientes del regional más o menos importantes según la naturaleza y profundidad del material impermeable.

A pesar de situarse geográficamente en las áreas próximas a las descargas del acuífero regional, éstas se ven impedidas por la potencia del material arcilloso superficial. Se trata de laguna en general poco turbias.

En cuanto a sus comunidades biológicas características responden a los mismos patrones que el tipo anterior.

Las lagunas representativas de este tipo son Charca Seca, Baldíos, Retamalón y Laguna Delgada.

## **B) FORMACIONES PALUSTRES HIPOGENICAS**

### **B.1. De flujos cortos**

Se trata de charcas tipo "ojos", profundas, redondas y con ausencia de playa o zona de transición, originadas por descargas de flujos locales. Aunque se encuentran situadas en regiones elevadas del área de estudio (sector 4) se localizan fundamentalmente en las zonas de contacto entre diferentes materiales, en nuestro caso entre materiales terciarios de los terrenos arcósicos y cuaternarios de las terrazas fluviales.

El llenado y vaciado de sus cubetas es pausado y las fluctuaciones en el nivel de las aguas son lentas y llevan un cierto desfase respecto al balance precipitación-evaporación.

Sus aguas son transparentes y dulces, de carácter neutro, algo tamponadas, con dominancia del bicarbonato y el calcio y con alto contenido en silicato procedente de la hidrólisis de minerales silicatados en las primeras fases de la infiltración del agua que posteriormente descarga en las cubetas.

El paso de la vegetación higrófila a la de la cuenca no se hace de forma brusca sino en un gradiente formado por bandas concéntricas.

Entre sus especies dominantes encontramos el crustaceo *Daphnia obtusa*, los odonatos *Ischnura pumilio*, *Lestes virens* y *Simpecma fusca*, y el género *Ranunculus* entre los macrófitos acuáticos.

Dentro de esta modalidad hemos encontrado los ojos de Aguajil y Navazarza.

## **B.2. De flujos regionales alcalinos.**

Formado por masas de agua situadas en la depresión de Maqueda-Sta Olalla-Hormigos (sector 3) donde se producen descargas regionales del acuífero alcalinizadas por envejecimiento. Se caracterizan por tener formas tipo "ojos", profundas, redondeadas o más alargadas.

Presentan numerosas eflorescencias salinas por los alrededores de su cuenca. El tiempo de permanencia de sus aguas suele ser amplio (hasta 8 meses al año). Sus aguas son de caracter subsalino, de pH básico, ricas en sodio y muy tamponadas.

Entre las especies características que incluyen este grupo de lagunas podemos destacar *Lymnaea peregra*, *L. truncatula* y *Chara vulgaris* como organismos que pueden aparecer en aguas alcalinas. El crustaceo *Simocephalus vetulus* aparece como indicador de aguas más o menos permanentes.

Dentro de este tipo se incluyen el Ojo del Bravo, Sanchibuey y Fuente del Valle, a pesar de que esta última se encuentra afectada por vertidos que condicionan la existencia de poblaciones adaptadas a vivir en aguas eutrofizadas.

### **B.3. De flujos regionales mixtos**

Está constituido por lagunas de aguas hiposalinas y mesosalinas al verse afectadas directamente por aguas subterráneas profundas, muy evolucionadas y en contacto con evaporitas. De esta forma puede explicarse su elevada concentración iónica a pesar de asentarse sobre materiales no salíferos (arenas arcósicas). Se sitúan en la zona occidental y más deprimida del acuífero (sector 1).

Presentan cubetas difusas con numerosas eflorescencias y pequeñas costras salinas, con orillas tipo playa y aguas muy someras, típicamente clorurado sódicas y muy poco turbias.

Su fauna acuática se caracteriza por poseer comunidades más o menos simples con presencia de especies halófilas como los copépodos *Cletocamptus retrogressus*, *Arctodiaptomus salinus*, *A. wierzejskii*, el cladóceros *Alona salina* y el macrófito acuático *Ruppia drepanensis*.

En este grupo se incluyen la laguna de las Torres y la del Manantial de la Mata.

### **5.7. DISCUSION**

En el caso de los humedales estudiados, la hidrología superficial y subterránea ha resultado la pieza clave con la que se ha podido relacionar las características estructurales de cada sistema con su funcionamiento global.

Sin embargo la integración de estos aspectos desde un punto de vista genético y funcional, no es tenida en cuenta en la mayoría de las clasificaciones de humedales realizadas en las que se atiende sólo a aquellos factores del medio físico afectados de mayor variabilidad tales como hidroquímica de sus aguas, turbiedad o composición biológica (Alonso & Comelles, 1981) o bien se basan únicamente en aspectos hidrológicos (Novitzki, 1979).

Las características morfométricas que son utilizadas con frecuencia en limnología fluvial para dar una interpretación coherente a los paisajes

fluviales (Castillo et al., 1988) o en estudios referentes a lagos donde la forma de las cubetas es un importante indicador del origen y funcionamiento del sistema (Hutchinson, 1975), son aspectos no tratados en profundidad en los estudios de humedales (Florín, en prensa).

A pesar de ello, se conoce la importancia del tamaño, profundidad y naturaleza de las cubetas de las formaciones palustres a la hora de delimitar su régimen hídrico potencial (Millar, 1973) además de que pueden resultar unos excelentes indicadores de procesos hidrogeológicos (González Bernáldez et al., 1989b) y de aquellos relativos a su origen.

Por otro lado, el conocimiento de las características fisiográficas, sobre todo la topografía y régimen hídrico (USFWS, 1984) también es básico para entender el funcionamiento de los humedales, ya que el agua es la influencia ambiental dominante, y como tal debe considerársela el punto central tanto para la clasificación (Zimmerman, 1987) como para la evaluación de sectores ambientales con sentido limnológico (Bailey, 1984).

Otro grupo de características frecuentemente utilizadas son las referentes a la físico-química de las aguas del humedal.

En efecto, en las formaciones palustres de pequeño tamaño, que están íntimamente relacionadas con el medio terrestre, son la salinidad y la turbiedad de las aguas, entre otros, los parámetros que gozan de mayor variabilidad (Alonso, 1987). Es este hecho, junto a la facilidad de cuantificación e interpretación de los



parámetros físico-químicos, lo que ha hecho considerarlos como factores importantes a la hora de tipificar humedales (Zimmerman et al., 1983; Montes & Martino, 1987) y para la evaluación de sectores ambientales (Heiskary et al., 1987; Rohm et al., 1987; Whittier et al., 1988).

Tradicionalmente, se ha considerado, que las sales contenidas en las aguas continentales procedían de las disueltas en el agua de lluvia, y en mayor grado del agua de escorrentía superficial que lavaba terrenos relativamente solubles, siendo los mecanismos fundamentales que controlaban su concentración iónica los equilibrios entre los iones mayoritarios y sus índices de solubilidad relativa (Langbein, 1961); de los tres mecanismos naturales que controlan la composición química de las aguas superficiales: precipitación atmosférica, mineralización en equilibrio con las rocas y procesos de evaporación y precipitación (Clarke, 1924; Gibbs, 1970) es este último el que domina en las regiones áridas y semiáridas (Kilham, 1990).

Sólo recientemente, se ha empezado a considerar el papel que la descarga de aguas subterráneas tiene en la mineralización de las aguas superficiales (Kubly, 1982; Hammer, 1986; González Bernáldez, 1987). Así, los humedales dominados por entradas de agua subterránea, tendrán características químicas similares a éstas, ya que será la fuente dominante de iones (Winter & Woo, 1988), lo que confiere un nuevo punto de vista a los criterios utilizados para la clasificación de humedales.

Por último, hay que señalar que una de las mayores

ventajas de usar medidas biológicas en los estudios regionales de humedales es que los organismos integran y reflejan la totalidad de las condiciones físico-químicas de las aguas a lo largo del tiempo (Hugues & Omernik, 1981).

La utilización de plantas acuáticas para la clasificación de sistemas limnológicos es utilizada con frecuencia (Jensen, 1979; Rintanen, 1982), así como las comunidades planctónicas (Alonso & Comelles, 1984) siendo éstas últimas las más idóneas para este tipo de trabajos, ya que son más estables y tienen una respuesta más retardada a los cambios ambientales (Alonso & Comelles, 1981).

Otros grupos de organismos también han sido utilizados para la clasificación de ecosistemas acuáticos, sobre todo ríos de Estados Unidos (Hugues & Omernik, 1981; Larsen & Omernik, 1986; Rohm et al., 1987; Whittier et al., 1988).

Las diferentes tipologías estructurales conformadas mediante la utilización de cada uno de estos factores (apartados 5.3.2; 5.4.5 y 5.5.2) y su integración, utilizando como hilo conductor la sectorización ambiental basada en factores superficiales y subterráneos del medio físico (capítulo 3) han perfilado, dos clases principales de humedales, definidos fundamentalmente por el carácter de los procesos hidrológicos que en ellos se desarrollan. De esta forma, todos los sistemas palustres pertenecientes a un mismo tipo, comparten el mismo origen y funcionamiento con una alta correlación en la expresión de sus características físicas, químicas y biológicas.

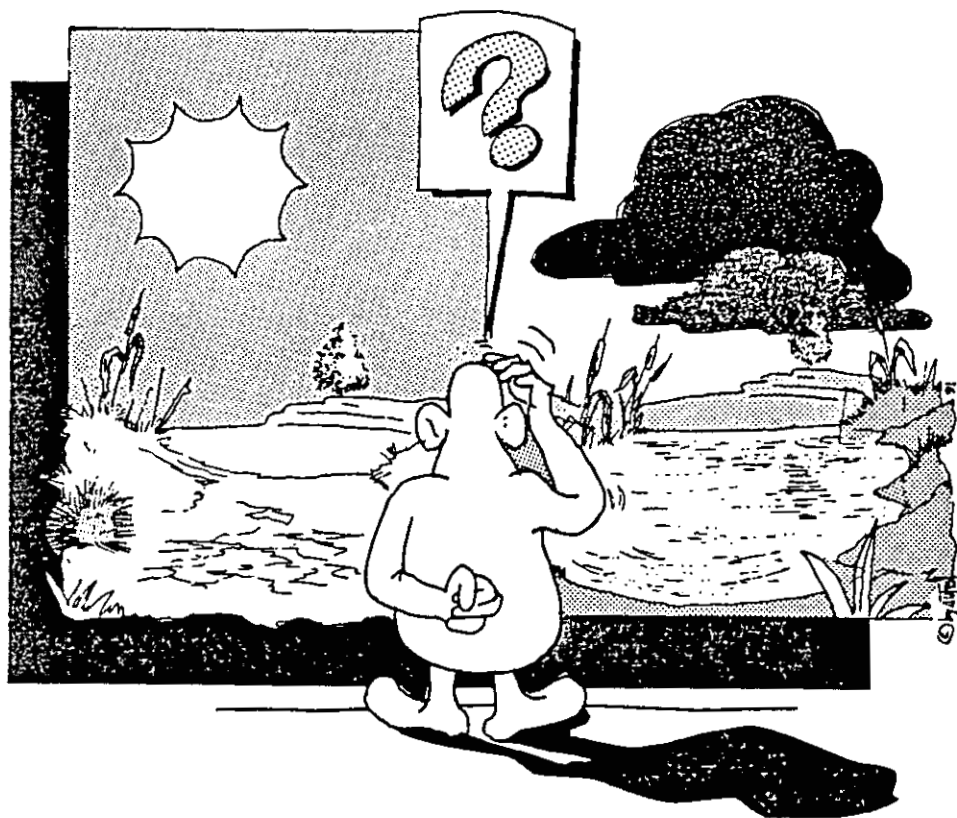
Así, se ha llegado a distinguir por un lado, formaciones palustres epigénicas, en las que la influencia de los aspectos hidrológicos superficiales es decisiva para su mantenimiento y formaciones palustres hipogénicas, en las que las aguas subterráneas ejercen el papel primordial.

Asímismo, los resultados obtenidos ponen de relieve, la gran coincidencia de dichos tipos con las características descritas para los sectores ambientales en los que se sitúan.

Incluso aquellas áreas con ciertos problemas en su delimitación quedan claramente interpretadas a través de los tipos genético-funcionales descritos.

Por un lado, el sector denominado de rañas, que adquirió entidad propia a través de observaciones de campo, mantiene formaciones palustres de tipo epigénicos tal y como se predijo en el capítulo 3.

El otro sector con poca entidad por incluir áreas de descarga local y de recarga regional, puede dividirse en estas dos zonas en virtud de los resultados obtenidos en la clasificación genético-funcional.



6. MODELOS DE FUNCIONAMIENTO  
EN FORMACIONES PALUSTRES  
CON DISTINTO GRADO DE  
RELACION CON EL AGUA  
SUBTERRANEA.

### **6.1. INTRODUCCION**

Debido a que las clasificaciones de formaciones palustres se realizan normalmente sobre generalizaciones de algunas de sus características más relevantes, éstas deben considerarse únicamente como primer paso para determinar el funcionamiento de los humedales en un contexto hidrológico regional (Winter, 1976). Estas aproximaciones deben ir seguidas de estudios hidrológicos periódicos que descubran las variaciones temporales específicas de cada tipo genetico-funcional de humedal.

El modo en que cada uno de ellos mantiene sus fluctuaciones y responde a ellas, es pieza clave para una interpretación correcta de las clasificaciones realizadas.

En nuestro caso, las consideraciones hidrológicas necesarias para entender el funcionamiento de los humedales del acuífero de Madrid, pasan por un estudio detallado espacio-temporal de sus aspectos hidrológicos e hidroquímicos.

La combinación y comparación de métodos independientes, principalmente hidrometeorológicos, hidromecánicos (aplicación de la ley de Darcy conociendo gradientes hidráulicos y ritmo de descenso de niveles piezométricos) e hidroquímicos permite aumentar la precisión de los balances hídricos obteniendo resultados más ajustados que con el estudio de cualquiera de estos aspectos por separado (Custodio & Llamas, 1983; Mijailov, 1989).

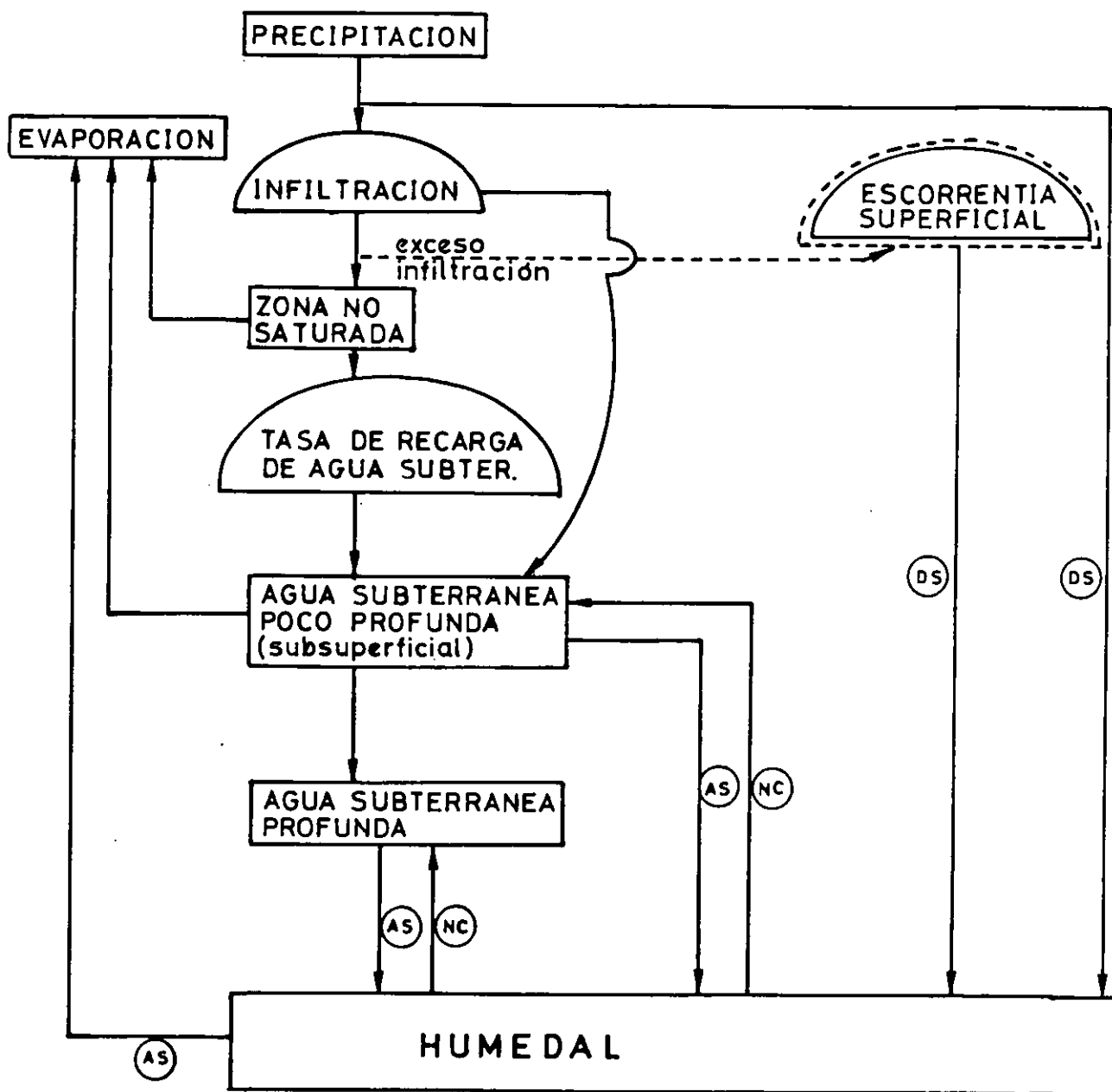
En este sentido, el estudio de la evolución geoquímica conjunta del agua del humedal y de sus entradas y salidas proporciona una información valiosa para interpretar los cambios en la salinidad de las lagunas a través de procesos hidrológicos.

El objetivo del presente capítulo, es poner de manifiesto los factores fundamentales que afectan a la regulación hídrica de los humedales del acuífero de Madrid, y en definitiva, detectar la trascendencia que el agua subterránea tiene en su clasificación genético-funcional. Mediante la utilización de balances hídricos contrastados con aspectos hidromecánicos e hidroquímicos se pretende conocer los mecanismos provocadores y reguladores de la inundación y de la salinidad de dichas lagunas, tal y como se expone en el modelo conceptual de la Figura 6.1.

## **6.2. METODOLOGIA**

### **6.2.1. Elección de las estaciones de muestreo y periodicidad en la toma de datos.**

Para estudiar la evolución hidrológica e hidroquímica de humedales con distinto grado de relación con el agua subterránea, se eligieron cuatro enclaves de entre todos los tipos genético-funcionales establecidos en el capítulo 5 de este trabajo (Figura 6.2).



#### COMPONENTES HIDROLOGICOS

- ALMACENAMIENTO DE AGUA
- PROCESOS HIDROLOGICOS
- MEDIDAS NO EFECTUADAS EN EL ACUIFERO DE MADRID

#### PROCESOS QUIMICOS

- (AS) AUMENTA LA SALINIDAD EN EL AGUA DEL HUMEDAL
- (DS) DISMINUYE LA SALINIDAD EN EL AGUA DEL HUMEDAL
- (NC) NO CAMBIOS EN LA SALINIDAD DEL AGUA DEL HUMEDAL

FIGURA 6.1. Esquema general de procesos hidrológicos y químicos que condicionan las características de las aguas de los humedales (Modificado de Crowe, 1989).

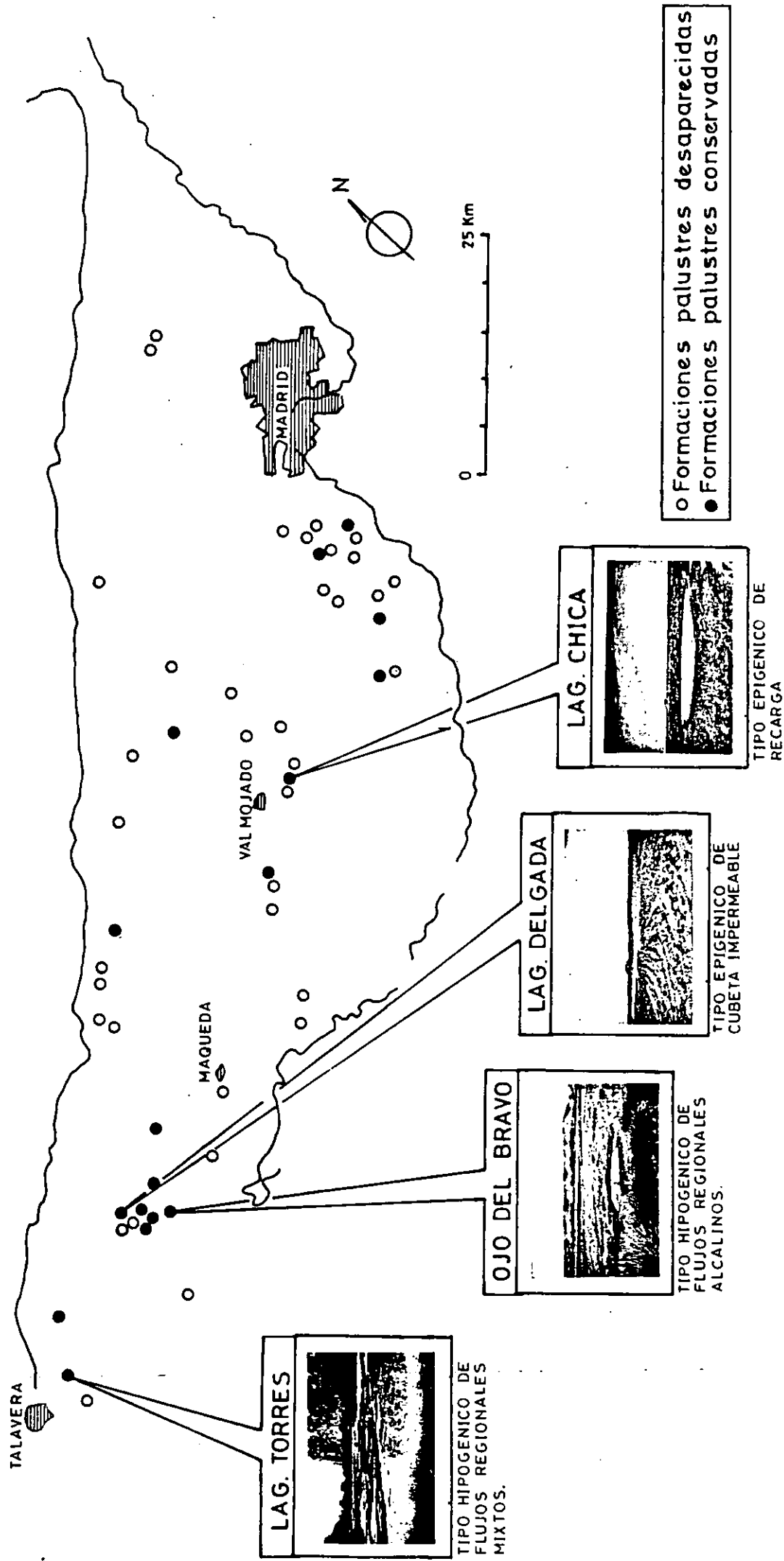


FIGURA 6.2. Formaciones palustres del acuífero de Madrid elegidas para realizar el estudio intensivo durante dos ciclos hidrológicos.



Los criterios utilizados para la elección de estas lagunas como estaciones de muestreo fijas, fueron fundamentalmente los que siguen:

a) Representatividad. Se tomó una laguna de cada tipo, intentando que ésta manifestara el máximo de características que lo definen. En este sentido, hay que señalar, que no fue posible hacer un seguimiento de ninguna laguna representante del tipo hipogénico de flujos cortos, al no ser posible obtener permiso para acceder a las fincas privadas donde se encontraban.

b) Estado de conservación. Uno de los requisitos básicos, para cumplir el objetivo de esta fase intensiva del estudio, era poseer la certeza de que los sistemas elegidos no sufrían ningún tipo de alteración antrópica evidente. Por ello, todas las lagunas estudiadas fueron elegidas en la provincia de Toledo, región menos alterada por factores de tensión, como se comentaba en el capítulo 4.

c) Accesibilidad. Teniendo en cuenta los numerosos muestreos a realizar en el seguimiento hidrológico e hidroquímico de las lagunas elegidas, el hecho de que éstas tuvieran fácil acceso tuvo un peso importante dentro del diseño de los muestreos. Se tomó como eje central la carretera Nacional V a cuyos lados se encontraban las lagunas que fueron estudiadas.

Estas fueron Laguna Chica representativa del tipo epigénico de recarga; Laguna Delgada (tipo epigénico de cubeta impermeable); Ojo del Bravo (tipo hipogénico de flujos regionales alcalinos) y Laguna de las Torres (tipo hipogénico de flujos regionales mixtos).

Se consideró que la recogida de datos con un intervalo de aproximadamente 15 días entre muestreo y muestreo era una periodicidad idónea para registrar las variaciones ocurridas en cada laguna durante los ciclos hidrológicos estudiados. Este intervalo de tiempo permitía un procesado correcto de las muestras, especialmente la realización de análisis químicos del agua, además de tener en cuenta que la exactitud en la estima de entradas y salidas de agua subterránea en los balances hídricos, aumenta con el número de muestreos realizados y a medida que el tiempo intermuestreo disminuye (Crowe, 1989). En definitiva, cuanto menor es el intervalo de tiempo elegido, más se minimizan los errores que se introducen en los balances donde una de las variables es obtenida por diferencia (Custodio & Llamas, 1983).

En total se realizaron 20 medidas en cada laguna durante el período comprendido entre Enero de 1988 y Julio de 1989.

#### **6.2.2. Medidas de los componentes básicos del balance hídrico en cada laguna**

Los balances hídricos completos son en general difíciles de realizar en parte porque requieren el empleo de aparatos sofisticados y caros de los que normalmente no se dispone (Winter, 1977; Kadlec, 1983). En este sentido, es especialmente compleja la medida de la evapotranspiración y de las entradas y salidas de agua subterránea al humedal (Zimmerman, 1987) siendo

estos últimos componentes los que o bien no se consideran o bien se calculan generalmente como término residual del balance hídrico global, también denominado dato por cierre de balance (Custodio & Llamas, 1983).

El empleo de estos términos residuales en los balances hídricos resulta bastante problemático, ya que engloban la suma de errores de cada uno de los componentes del balance, obtenidos a través de diversas técnicas (Winter, 1981b), por lo que debe actuarse con gran prudencia con estos datos en especial cuando proceden de diferencias entre valores de números muy parecidos (Custodio & Llamas, 1983).

En todas las ocasiones en que no se realizan medidas directas de todas las entradas y salidas de agua al humedal, es imprescindible dejar constancia del porcentaje de error que poseen las medidas realizadas, para evaluar la validez real de los resultados obtenidos (Winter, 1981b; LaBaugh, 1986).

La forma más habitual de estimar dichos errores es la comparación de varios métodos de medida para el mismo parámetro (Custodio, 1973; Zektzer, 1973b), y este es el método que se empleará en el presente trabajo.

Winter (1981b) revisó numerosos balances hídricos realizados para lagos y humedales y extrajo valores medios de error para cada método empleado, que pueden extrapolarse para otros estudios que utilicen semejantes metodologías.

De hecho, en la actualidad, la mayoría de los trabajos referentes a balances hídricos incorporan a

sus resultados la estimación de los errores de cada componente que interviene en la ecuación, ya sea con cálculos propios o teniendo como referencia dicha revisión.

También es frecuente para el cálculo de los errores, la utilización de la relación propuesta por Dooge (1975), cuando se miden todos los componentes del balance:

$$b = E - S - DV$$

donde

b es la desviación de cero que tiene el balance que será debida al error de medida de uno o más componentes.

E se refiere a las entradas de agua.

S se refiere a las salidas de agua.

DV es la variación en el almacenamiento de agua en el humedal.

Sin embargo, hay que tener en cuenta, que un valor pequeño de b, no es garantía de que el error sea pequeño, ya que algunos errores de medida pueden quedar compensados.

Hasta la fecha la validez de los balances hídricos ha levantado frecuentes discusiones a favor y en contra. Sin embargo deben valorarse en su justa medida, ya que a pesar de sus cuantiosos errores, se trata de una herramienta útil no sólo para situar el orden de magnitud de cada componente hidrológico que interviene, sino también para comparar distintos sistemas palustres

(Custodio & Llamas, 1983). Estas consideraciones son las que han llevado a la realización de balances hídricos para los humedales del acuífero de Madrid.

Para dichos humedales, la ecuación del balance de agua realizado puede escribirse como:

$$P - E \pm S = DV/Dt$$

donde

P = precipitación directa sobre la superficie de la laguna (en  $m^3$  al considerarse la superficie del humedal)

E = evaporación desde la lámina de agua libre (en  $m^3$  al considerarse la superficie del humedal).

S = aportación o infiltración de agua subterránea desde o hacia la laguna ( $m^3$ ).

DV/Dt = variaciones del volumen de agua almacenado en la laguna en el tiempo t ( $m^3$ ).

Ninguna de las cuatro lagunas posee corrientes naturales afluentes o efluentes que sea necesario introducir en el balance. Unicamente, la laguna de las Torres, se encuentra drenada por un canal artificial que la atraviesa y que permanece con agua durante casi todo el año.

También la escorrentía superficial se ha considerado nula, al tratarse de cuencas de recepción que no superan en ningún caso el 5% de pendiente máxima, además de tratarse de terrenos arenosos.

De los métodos más utilizados para obtener los datos que intervienen en el balance hídrico y recopilados en la revisión realizada por LaBaugh (1986) (Tabla 6.1) se han empleado en el siguiente estudio, los que se describen a continuación:

a) Componentes superficiales.

Para la recopilación de datos referentes al agua atmosférica, no se dispuso de aparatos de medida (pluviómetros y evaporímetros) instalados en las lagunas. Por ello, se ha recurrido a los datos recopilados por el Instituto Nacional de Meteorología para el periodo estudiado, práctica por otro lado, bastante frecuente en los estudios de balances hídricos en lagos y humedales (Winter, 1981b).

En numerosos estudios de balances hídricos se utiliza la evapotranspiración como medida del agua que escapa a la atmosfera desde el humedal. Para este trabajo, se ha preferido utilizar la evaporación ya que en la mayoría de los casos se trata fundamentalmente de láminas de agua libre.

Aunque la amplia red de estaciones meteorológicas en el área de estudio, podría ofrecer una información extensa y valiosa, lo cierto es que los datos registrados, sobre todo los referentes a evaporación, ofrecen errores importantes ya que se sigue utilizando en casi todas las estaciones el evaporímetro Piché. Por otro lado, tampoco se recogen datos suficientes en la mayoría de las estaciones como para calcular este parámetro, mediante métodos semiempíricos como puede ser el de Penman (1948).

TABLA 6.1. Métodos utilizados con más frecuencia en la obtención de los componentes que intervienen en los balances hídricos de humedales (Modificado de LaBaugh, 1986).

REFERENCIA	AGUA ATMOSFERICA		AGUA SUPERFICIAL		ESCORRENTIA	ALMACENAMIENTO DE AGUA EN EL HUMEDAL		AGUA SUBTERRANEA
	Precipitación	Evaporación	Afluentes	Efluentes				
Crisp (1966)	PD	P-Ef	N	FC	NC	NC		NC
Eisenlohr (1972)	PC	TM, RES	N	N	A	LC		RES
Valiela et al. (1978)	PD	NC	N	OC	NC	OC		DII,
Mitsch et al. (1979)	PD	E, A	FC	FC	A	LC		RES
Hemond (1980)	PC	SH	N	OC	SH	LC		OC
Winter & Carr (1980)	TM	N	N	N	NC	LC, ID		F
Verry & Timmons (1982)	PD	RES	N	FC	SH	LC		OC

PD = Pluviómetro, medidas discontinuas.

PC = Pluviómetro, medidas continuas.

P-Ef = Calculado por diferencia entre la entrada por precipitación y la salida en el efluente. Calibrado con lisímetro y ecuación de Peman.

E = Evaporímetro.

A = Calculada a través de los cambios en el almacenamiento de agua en el humedal.

RES = Calculado como término residual del balance hídrico

SH = Calculado por la técnica de separación del hidrograma.

NC = No considerado en el cálculo.

TM = Método de transferencia de masas.

N = No existe ese componente en el humedal estudiado.

FC = Medida de flujo. Continua.

OC = Medidas ocasionales.

LC = Limímetro, medidas en continuo.

ID = Limímetro, medidas discontinuas.

DTL = Calculada a partir de la disolución del agua del mar por agua subterránea a través de datos de salinidad.

F = Análisis del flujo a través de medidas en pozos y piezómetros.

En el área de estudio, únicamente la estación de Cuatro Vientos (aeropuerto) posee un tanque evaporímetro tipo A o tipo americano con un buen registro.

La descripción de este último evaporímetro y del de tipo Piché puede encontrarse en Custodio & Llamas (1983).

La elección de los datos suministrados por la estación de Cuatro Vientos, ofrece una clara fuente de error inherente a la distancia que la separa de las lagunas estudiadas (en el caso de la laguna más alejada, la laguna de las Torres, esta distancia es de aproximadamente 85 Kms).

El error cometido utilizando valores de evaporación con métodos distintos al evaporímetro tipo A puede llegar a ser del 30% para períodos mensuales (Winter, 1981b), mientras que según el mismo autor, los errores causados por el emplazamiento de las estaciones puede ser del 5-15% para datos mensuales por lo que, se ha preferido utilizar solamente los datos de la estación de Cuatro Vientos para todos los balances.

Además, en nuestro caso, éste último porcentaje de error puede verse bastante reducido teniendo en cuenta la homogeneidad climática del área de estudio (ver apartado 3.1.1).

Por otro lado, no es raro encontrar en la literatura balances hídricos realizados a partir de datos de estaciones situadas a más de 100 Kms del ecosistema estudiado (Phillips & Van Denburgh, 1971;



Shapiro & Pfannkuch, 1973; Hetling et al., 1977; Powers et al., 1977).

Para la estación de Cuatro Vientos, se ha calculado el error cometido por diversos tipos de medida de evaporación y evapotranspiración (evaporímetro Piché, Thornthwaite y Penman) en comparación con las medidas que ofrece el evaporímetro tipo A, consideradas para estos calculo como exactas.

Así, se puede comprobar si el error en las medidas de evaporación con métodos distintos al tipo A en el acuífero de Madrid y para los períodos estudiados difieren de los encontrados por Winter (1981b) para lagos de Estados Unidos, ratificando de esta forma, la elección de la estación meteorológica.

Para el cálculo del volumen de agua de entrada vía precipitación atmosférica, se ha considerado la superficie máxima de cada cubeta, mientras que para estimar el volumen de salidas de agua a traves de la evaporación directa, se ha tenido en cuenta la superficie de las lagunas en cada muestreo.

#### b) Componentes subterráneos.

La intervención del agua subterránea en el balance, ya sea positiva (descarga) o negativa (recarga o infiltración) no se ha medido directamente y se ha calculado como término residual de las ecuaciones. Tampoco se ha considerado la posibilidad de una entrada y salida simultanea de la laguna en diferentes partes de la cubeta, para simplificar el modelo de funcionamiento.

Sin embargo, se han realizado observaciones de la conexión hidráulica con el agua subterránea mediante medidas periódicas de la profundidad del nivel freático en piezómetros instalados en las orillas, cuyas oscilaciones se contrastaron con los resultados obtenidos del balance hídrico.

Hay que señalar a este respecto, que el empleo de instrumentos de medida directa de flujo de agua subterránea, no está demasiado extendido, salvo el caso de los piezómetros, cuya instalación es barata y simple (Siegel, 1988).

Entre los aparatos citados en la bibliografía como interesantes para estudios limnológicos, caben citarse los diseñados por Lee (1977) y utilizados por Lodge et al. (1989) con buenos resultados, el de Lock & John (1978) y el potenciománometro hidráulico propuesto por Winter et al. (1988) y que es una versión modificada del manómetro y sonda discutido por Fokkens & Weijenberg (1968) y un piezómetro diseñado por Parry (1971).

La utilización de isótopos radiactivos como trazadores para averiguar la proporción de agua subterránea que llega a la superficie, es una técnica aplicada por el momento unicamente a cursos fluviales (Rodhe, 1985).

En las orillas de las cuatro lagunas estudiadas se colocaron piezómetros, que consisten en perforaciones acondicionadas para poder realizar la medida de la profundidad del nivel piezométrico. En nuestro caso se trataba de tubos huecos de PVC de 35 mm de diámetro con

una rejilla en el fondo para evitar la entrada de arcillas y limos. Al estar agujereados por el extremo distal, permitieron medir unicamente la conductividad hidráulica vertical (Boersma, 1965; Rycroft et al., 1975).

Las profundidades a las que se instalaron fueron variables (Tabla 6.2) dependiendo de la naturaleza de los materiales. La utilización de una sonda manual para las perforaciones, impidió en algunos de los casos, llegar a profundizar lo suficiente como para interceptar la superficie freática, sobre todo en áreas de recarga regional del acuífero.

En la laguna Delgada, situada sobre rañas pliocenas se utilizó además a modo de piezómetro profundo un pozo de 6,5 m de profundidad situado en las cercanías de la laguna (Tabla 6.2).

En la laguna de las Torres, también se tomaron medidas de los niveles subterráneos en un piezómetro situado en el centro de la laguna e instalado por Herrera (1987) para sus investigaciones.

Los niveles piezométricos se midieron con un limnómetro cuya precisión es de  $\pm 0,5$  cm si el aparato funciona correctamente (Custodio & Llamas, 1983).

Dado que la correlación entre pluviometría y oscilaciones de los niveles de agua subterránea no siempre es clara, debido al retraso con que se produce el efecto de la recarga en los acuíferos, se ha preferido relacionar los niveles piezométricos con las desviaciones acumuladas de la pluviometría con respecto a la media según recomiendan Custodio & Llamas (1983).

**TABLA 6.2. Profundidad a la que fueron instalados los  
piezómetros con sonda manual y distancia de éstos a la  
orilla de cada laguna en el periodo de máxima inundación.**

LAGUNA	CLAVE PIEZOMETRO	PROFUNDIDAD PERFORACION (m)	DISTANCIA A LA ORILLA (m)
TORRES	TOC	0.4	Centro humedal 2
	TO	1.0	
CHICA	CH	1.1	3
DELGADA	DLP	6.5	9.6
	DL	1.0	826.5
OJO DEL BRAVO	OB	2.4	0.7

La variación registrada en los niveles piezométricos, permitió calcular el coeficiente de infiltración de cada tipo de terreno a través de la ley de Darcy (1856):

$$V = i * K$$

donde  $V$  = velocidad de infiltración en m/día o cm/s.

$i$  = gradiente hidráulico, que muestra la variación del nivel del agua a lo largo del camino recorrido por la infiltración (adimensional)  $(DH/DL)$

$K$  = coeficiente de infiltración o transmisividad que depende de las propiedades físicas de las rocas y el líquido filtrable en m/día o cm/s  $(DH/Dt)$ .

Si  $V = - DH/DL * K$

donde el signo negativo indica que la presión  $H$  disminuye a lo largo del camino recorrido por la infiltración.

$DH$  = diferencia de niveles

$DL$  = longitud del camino que recorre la infiltración.

Si  $DH=DL$ , entonces  $i=1$  con lo que  $V = -K = -DH/Dt$ .

En las perforaciones donde se instalaron los piezómetros se llevó a cabo una observación minuciosa de la granulometría del terreno llegándose incluso en algunos lugares a profundizar varios centímetros por debajo del piezómetro instalado.

c) Variaciones de las reservas hídricas de las lagunas.

A partir del mapa batimétrico de cada humedal (Figura 6.3) realizado *in situ* en el periodo de máxima inundación, se pudo calcular el volumen de agua retenido por las cubetas en cada muestreo. Con el empleo de estacas graduadas clavadas en el punto de máxima profundidad se registró el nivel alcanzado por el agua periódicamente durante los ciclos hidrológicos estudiados.

La superficie de cada humedal se calculó a partir de estos datos mediante el programa AUTOCAD.

El volumen de agua en cada muestreo fue calculado a partir de (Hakanson, 1981):

$$V_{laguna} = \sum V_{z_i - (z_{i-1})}$$

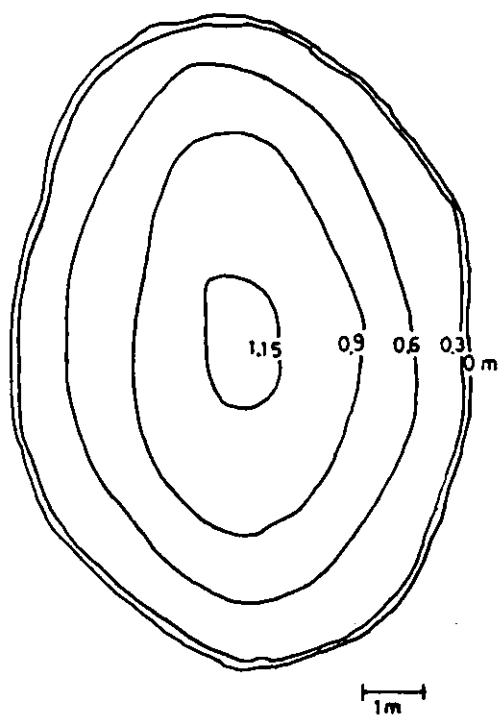
donde

$$V_{z_i - (z_{i-1})} = 1/3 (A_{z_{i-1}} + A_{z_i} + \sqrt{A_{z_{i-1}} * A_{z_i}}) (z_i - (z_{i-1}))$$

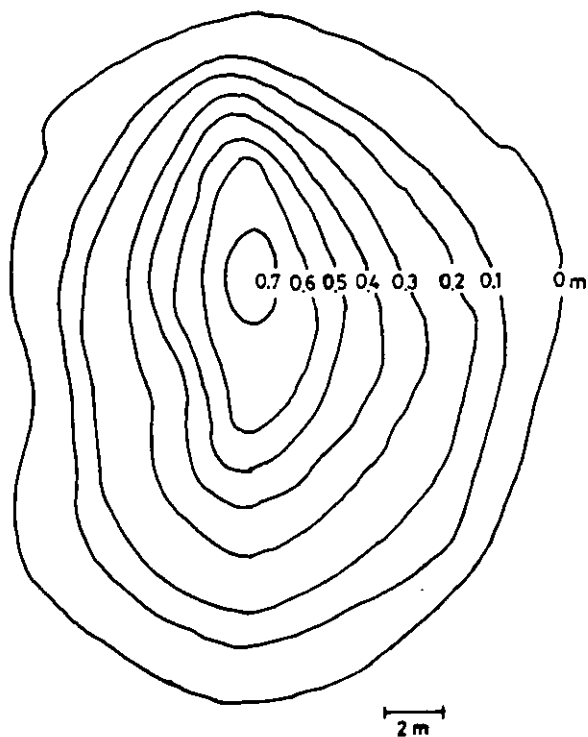
siendo

$A_{z_{i-1}}$  el área que incluye la línea de costa.

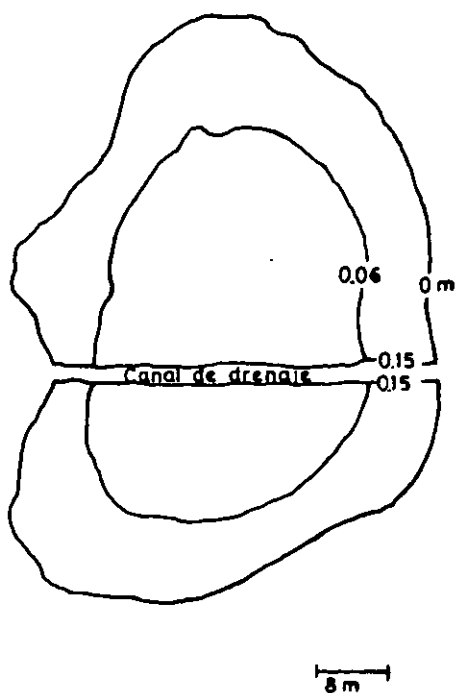
OJO DEL BRAVO



LAGUNA CHICA



LAGUNA DE LAS TORRES



LAGUNA DELGADA



FIGURA 6.3. Mapas batimétricos de las cuatro lagunas elegidas para su estudio intensivo, durante el periodo de máxima inundación.

$A_{z1}$  el área que incluye la primera línea de profundidad

$z_i - (z_{i-1})$  la distancia en profundidad entre líneas

Para la laguna de las Torres, que posee un canal artificial de drenaje, los valores de volumen de agua calculados fueron realizados a partir de una estimación *in situ* de la profundidad del canal y de la laguna en cada muestreo.

### 6.2.3. Análisis de parámetros químicos y cálculo de índices de saturación para algunos minerales.

La composición química del agua subterránea tomada de pozos demasiado profundos, puede que no sea representativo de la entrada de agua al humedal (John et al., 1977), por ello se han tomado muestras de agua únicamente en piezómetros poco profundos instalados en las proximidades de las lagunas.

Tanto de las cuatro lagunas como de los piezómetros se recogieron las muestras de agua con la misma periodicidad con que se midieron los niveles en ambos sistemas. El procesado y posterior análisis de las muestras, se realizó según la metodología comentada en el apartado 5.2.2. de este trabajo (Tabla 5.3).

De cada una de las muestras se midió conductividad,



pH, temperatura del agua y concentraciones de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$ , Alcalinidad total,  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{K}^+$ .

Se procedió así mismo al cálculo de la salinidad mediante la suma de los iones mayoritarios y al cálculo del error analítico que en ningún caso superó el 10% .

El cálculo del estado de saturación de las aguas con respecto a diversos minerales, en cuya composición entran a formar parte los iones mayoritarios medidos en este estudio, se realizó con el programa WATEQF (Plummer et al., 1976), calculando la fuerza iónica mediante el método de Debye-Hückel, con la que se corrigen las concentraciones analíticas. Las constantes de equilibrio utilizadas por el programa son apropiadas a la temperatura del agua (Hem, 1989).

El índice de saturación calculado responde a:

$$IS = \log \frac{\text{producto de solubilidad iónica (IAP)}}{\text{producto de solubilidad (KT)}}$$

$$\text{si } \log \frac{IAP}{KT}$$

es  $>0$  el agua se encontrará sobresaturada para ese mineral.

$=0$  el agua se encuentra en equilibrio para ese mineral.

$<0$  el agua se encontrará subsaturada para ese mineral.

### **6.3. EVAPORACION Y EVAPOTRANSPIRACION: COMPARACION DE VARIOS METODOS DE MEDIDA.**

La comparación realizada entre distintos métodos de medida de la evaporación y evapotranspiración, se realizó partiendo del hecho constatado (Winter, 1981b) de que el evaporímetro tipo A proporciona una medida mucho más exacta que otros aparatos y métodos semiempíricos, exceptuando el método de balance de energía que se considera el más exacto con errores en torno al 10% en estimas anuales y de 13% en períodos más cortos. A efectos del cálculo comparativo se consideró que las medidas efectuadas con el evaporímetro A poseían un error nulo con respecto al resto de estimaciones.

De la estación meteorológica de Cuatro Vientos, se tomó la evaporación directa en mm medida en el evaporímetro A y evaporímetro Piché, la temperatura media mensual para calcular la evapotranspiración por el método de Thornthwaite y el número de horas de insolación al mes, porcentaje de humedad relativa mensual y velocidad media mensual del viento a 2 m de altura del suelo para calcular la evaporación mediante el método de Penman (Apéndice 6.1).

El porcentaje de error de estas medidas con respecto al evaporímetro A se representó en diagramas de barras para los dos ciclos hidrológicos considerados (Octubre 87- Septiembre 89) (Figura 6.4).

En general, los errores son menores con la utilización del método de Penman, tanto en períodos mensuales como anuales, aunque para algunos meses,

éstos llegan a superar el 80%, sobre todo en invierno.

Para los tres métodos comparados, los valores son más exactos o más próximos a los medidos en el evaporímetro A durante los meses primaverales y muy especialmente en el mes de Marzo.

El método de Penman infravalora la evaporación observada en el evaporímetro tipo A, mientras que el evaporímetro Piché y el método de Thornthwaite, muestran una sobrevaloración de los mismos.

#### ***6.4. LAGUNA EPIGENICA DE RECARGA: LAGUNA CHICA.***

##### **6.4.1. Variaciones en los niveles de agua superficial y subterránea. Balance hídrico.**

La Figura 6.5 muestra las oscilaciones de los niveles de agua en la laguna Chica y en el piezómetro próximo (CH), para el periodo de tiempo comprendido entre Enero de 1988 y Julio de 1989.

Según la hipótesis de funcionamiento hidrológico barajada para esta laguna y otras semejantes pertenecientes al mismo tipo genético-funcional (ver apartado 5.6), el periodo de inundación se prolongaría de Enero a Mayo en un año climatológico medio.

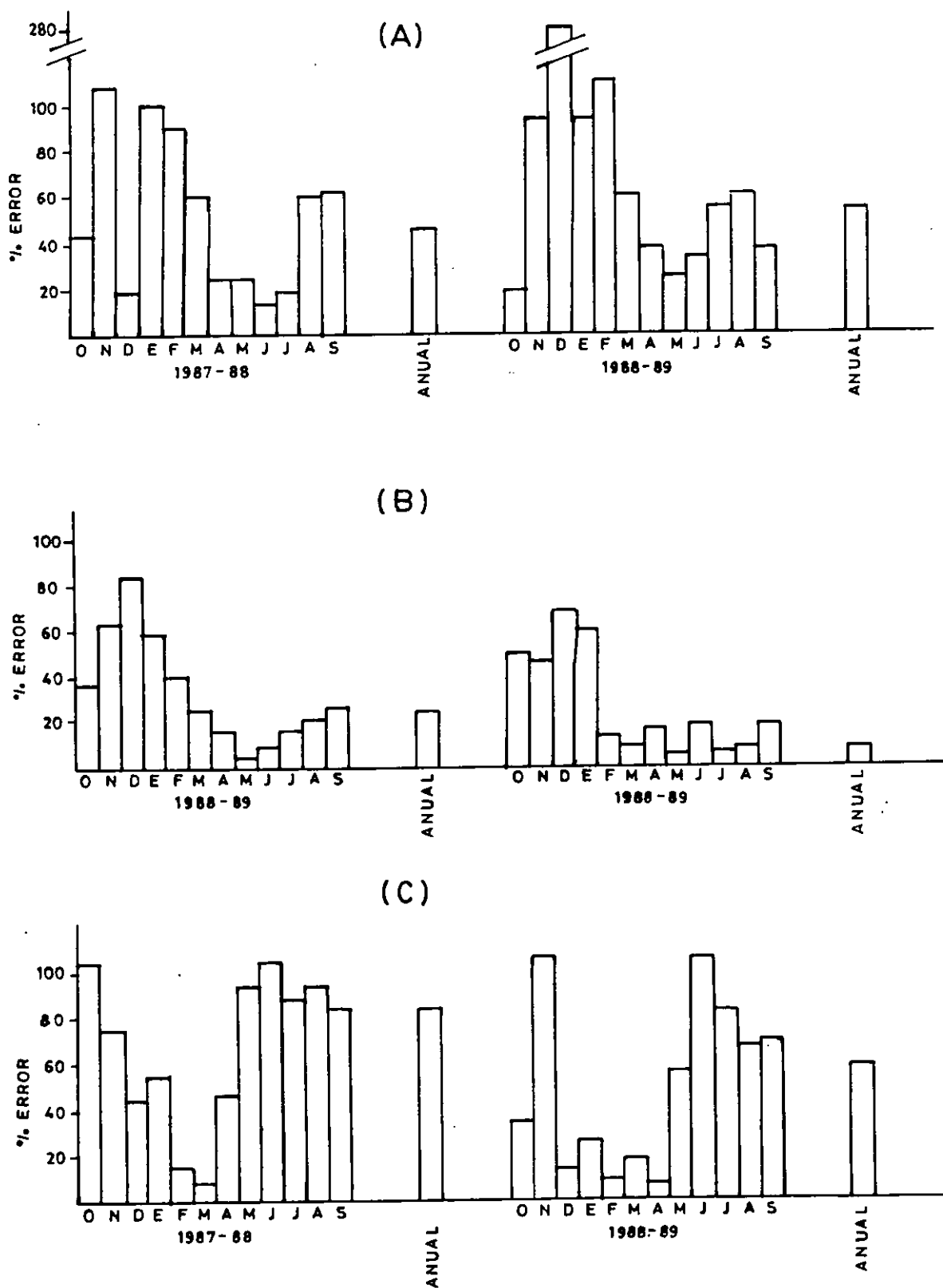


FIGURA 6.4. Cálculo del porcentaje de error en la medida de evaporación-evapotranspiración con respecto a los datos aportados por el evaporímetro tipo A en la estación meteorológica de Cuatro Vientos. (A) Evaporímetro tipo Piché. (B) Método de Penman (C) Método de Thornthwaite.

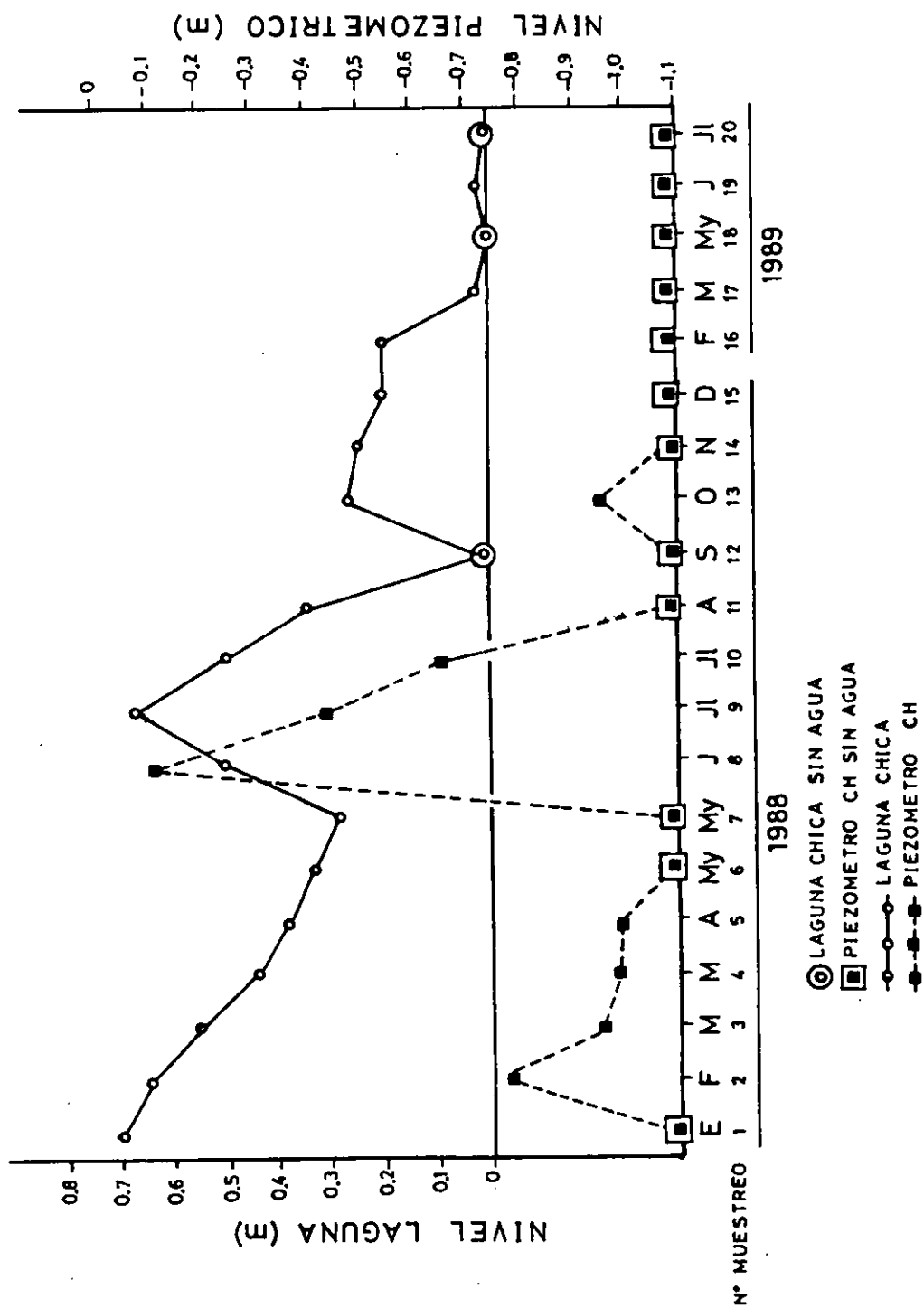


FIGURA 6.5. Oscilación de los niveles de agua registrados en la laguna Chica y el piezómetro CH (1,10 m de profundidad) durante el periodo de Enero de 1988 a Julio de 1989.

Sin embargo, aunque ésta parece ser la tendencia de la laguna Chica en los primeros meses del año 88, el nivel de agua sufre un aumento brusco en Mayo, alcanzando su máxima inundación en el mes de Julio, cuando la evaporación comienza a ser importante.

Durante este año, la desaparición completa de la lámina de agua se produjo en Septiembre, volviéndose a inundar rápidamente en Octubre.

Sin embargo, en el transcurso del segundo ciclo hidrológico el agua se mantuvo hasta el mes de Mayo.

En lo que se refiere a los niveles piezométricos en las proximidades de la laguna, éstos permanecieron a una profundidad  $< 1,1$  m en prácticamente todo el período estudiado, excepto en los muestreos, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10 y 13 en que se detectó agua en el piezómetro. De todos ellos, únicamente en Junio-88 (M8) el nivel freático se mantuvo por encima del nivel de la laguna (Figura 6.5).

Los resultados obtenidos a partir de los balances hídricos para cada muestreo aportan datos interesantes para interpretar estas oscilaciones (Tabla 6.3).

Durante los muestreos 1 (Enero 88), 8 (Junio 88) y 13 (Octubre 88) las entradas de agua superficial calculadas no son suficientes como para producir la variación de volumen medida en la laguna, por lo que cabe esperar un aporte adicional de agua subterránea, como se refleja en los resultados obtenidos de los balances hídricos.

Sin embargo, la cuantía de dichas entradas debe ser

analizada con precaución por haberse calculado el término  $S$  como residuo del balance, y en especial en los muestreos en los que la entrada de agua subterránea es de pocos  $m^3$ . En este sentido, los muestreos 1 y 13 (con 3.22 y 0.91  $m^3$  respectivamente) podrían carecer de significado, reflejando una entrada errónea de agua subterránea. Igual interpretación puede hacerse cuando la infiltración es próxima a cero.

Evalutando conjuntamente los resultados de los balances hídricos, evolución de los niveles piezométricos y precipitación y evaporación directa (Figura 6.6) se observa como el aporte de agua subterránea a la laguna, y para el período estudiado, se produce cuando confluyen dos tipos de circunstancias:

Por un lado, un período prolongado de lluvias de varios meses de duración, precede a estas descargas puntuales. En efecto, como se observa en el diagrama de desviaciones acumulados de la pluviometría con respecto a la media de la Figura 6.6, entre los muestreos 7 y 10 (Mayo a Julio de 1988) la duración e intensidad de las lluvia pudo provocar la aparición estacional de niveles acuíferos colgados. La estratificación del terreno con la existencia de lentejones más arcillosos intercalados entre los estratos más arenosos y citados para el acuífero de Madrid (Llamas, 1987), facilita esta interpretación.

La litología en las proximidades de la laguna Chica confirma esta relativa heterogeneidad de materiales en la vertical (Figura 6.7), ya que se observa un nivel de aproximadamente 0,95 m de material con mayor proporción de arena entre dos estratos más arcillosos

TABLA 6.3. Balance hídrico realizado para la laguna Chica en el periodo comprendido entre Enero 88 a Julio 89.

MUESTREO	VOLUMEN (m3) (1)	SUPERFIC. (m2) (2)	P (mm) (3)	E (mm) (4)	dV (m3) (5)	P (m3) (6)	E (m3) (7)	S (m3) (8)
1 (30-I-88)	80.59	327.60	59.6	41.5	+ 9.15	19.52	13.59	+ 3.22
2 (21-II-88)	65.55	270.21	43.3	33.2	-15.04	14.18	8.97	-20.25
3 (18-III-88)	42.72	199.19	1.0	94.6	-22.83	0.32	18.84	- 4.31
4 (29-III-88)	24.29	133.54	1.9	56.0	-18.43	0.62	7.48	-11.57
5 (18-IV-88)	18.28	102.33	61.0	56.3	- 6.01	19.90	5.76	-20.15
6 (4-V-88)	13.64	85.41	30.4	60.9	- 4.64	9.95	5.20	- 9.39
7 (25-V-88)	8.53	62.36	34.7	74.4	- 5.11	11.36	4.63	-11.84
8 (15-VI-88)	33.47	174.09	56.6	100.3	+24.90	18.54	17.46	+23.82
9 (3-VII-88)	71.33	295.80	60.6	113.7	+37.80	19.85	33.60	-24.05
10 (19-VII-88)	33.47	174.09	6.7	112.5	-37.80	2.19	19.58	-20.41
11 (2-VIII-88)	14.60	92.80	0.0	117.2	-18.80	0.00	10.87	- 7.93
12 (8-IX-88)	0.00	0.00	0.0	125.7	-14.60	0.00	0.00	-14.60
13 (26-X-88)	8.70	69.08	71.6	226.7	+ 8.70	23.45	15.66	+ 0.91
14 (25-XI-88)	8.50	63.10	30.7	30.3	- 0.20	10.05	1.91	- 8.34
15 (23-XII-88)	4.80	44.73	18.0	35.6	- 3.70	5.89	1.59	- 8.00
16 (26-II-89)	4.80	44.73	27.4	74.1	0.00	8.97	3.31	- 5.66
17 (12-III-89)	1.15	23.90	0.8	36.1	- 3.65	0.26	0.86	- 3.05
18 (22-V-89)	0.00	0.00	90.0	33.0	- 1.15	29.40	0.00	-30.55
19 (7-VI-89)	0.90	15.80	63.6	78.4	+ 0.90	20.83	1.23	-18.70
20 (18-VII-89)	0.00	0.00	4.5	302.7	- 0.90	1.47	0.00	- 2.37

(1) Volumen de la laguna en cada muestreo.

(2) Superficie de la laguna en cada muestreo.

(3) Precipitación total medida en la estación de Cuatro Vientos para cada muestreo.

(4) Evaporación total medida en la estación de Cuatro Vientos para cada muestreo.

(5) Variaciones en el volumen de la laguna entre dos muestreos consecutivos.

(6) Precipitación directa caída sobre la laguna. Cálculos realizados para una superficie máxima de 327.6 m2

(7) Evaporación de la lámina de agua libre en función de la superficie de la superficie de cada muestreo.

(8) Infiltración (-) o descarga de agua subterránea (+) en la cubeta obtenida como término residual del balance.



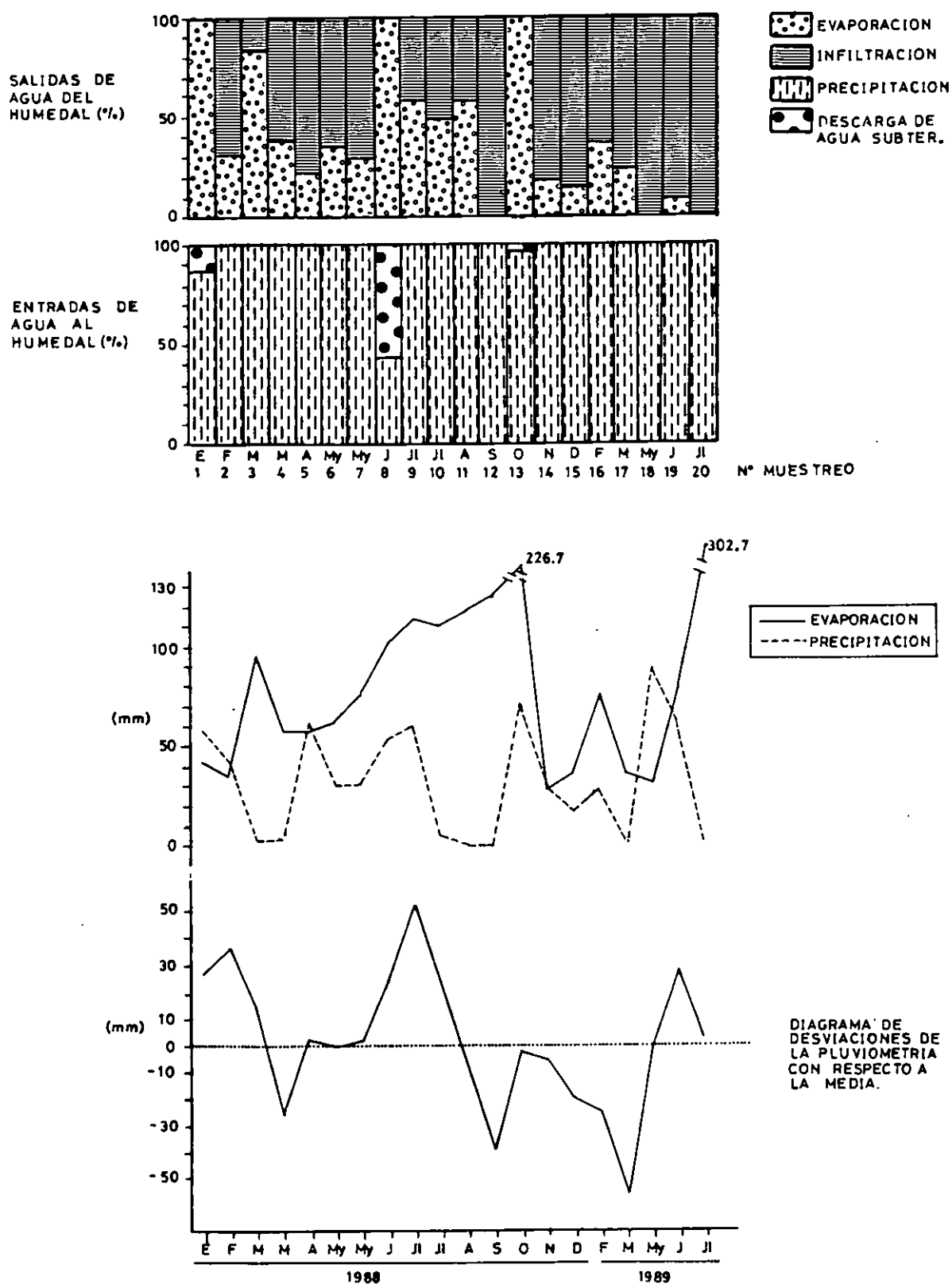


FIGURA 6.6. Porcentajes de entradas y salidas de agua en la laguna Chica, obtenidos del balance hídrico para cada muestreo. Precipitación y evaporación tomadas de la estación meteorológica de Cuatro Vientos.

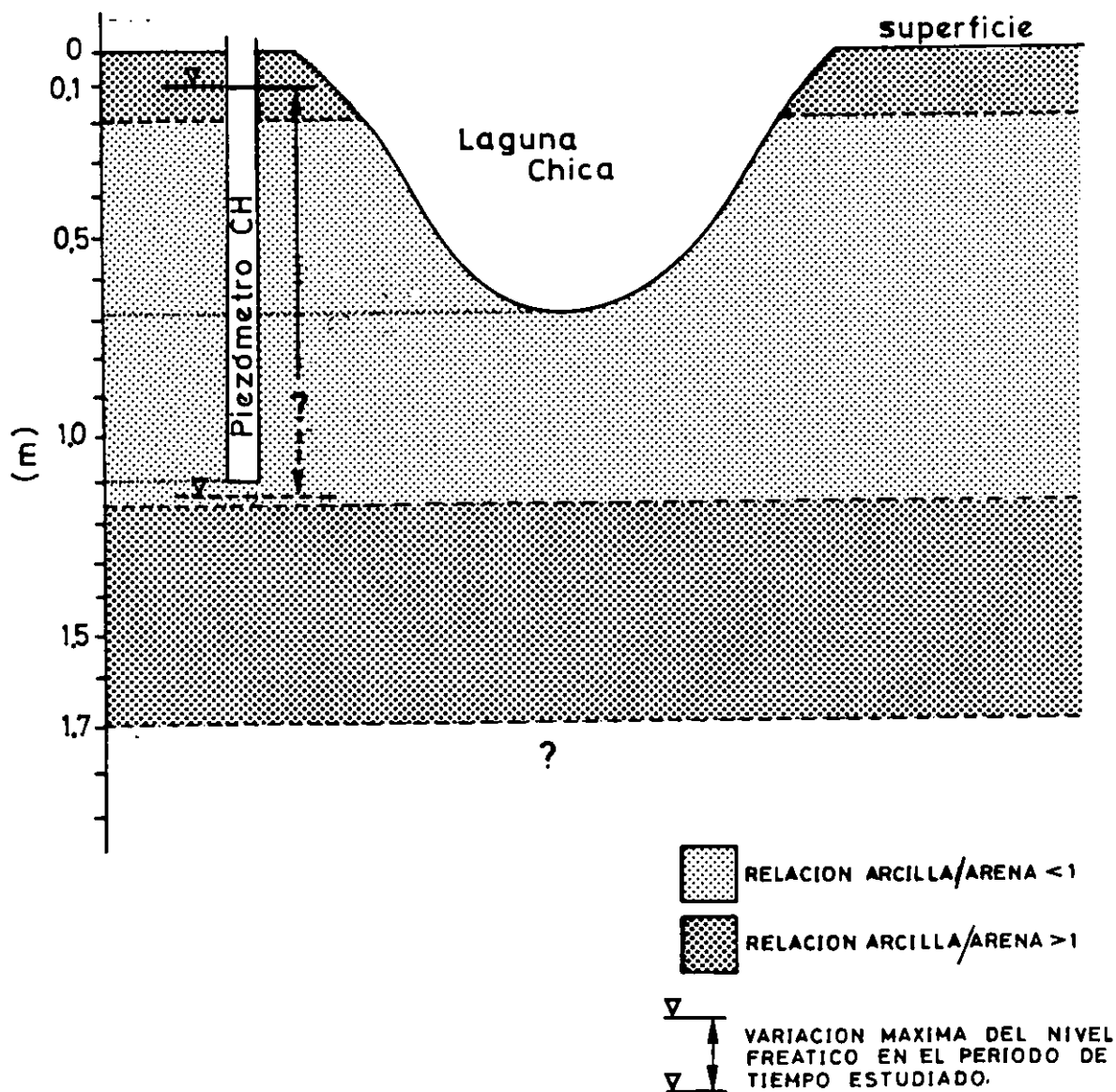


FIGURA 6.7. Perfil litológico esquemático en las proximidades de la laguna Chica.

y por tanto más impermeables.

Los valores del coeficiente de infiltración (K) obtenidos a través de la ley de Darcy (Tabla 6.4) reflejan asimismo la existencia de materiales limo-arenosos a la profundidad a la que ha sido instalado el piezómetro (Custodio & Llamas, 1983). Según la misma fuente, permeabilidades comprendidas entre  $10^{-2}$  y  $10^{-4}$  m/día reflejan la existencia de un acuitardo que para la zona en que nos encontramos, cabe esperar que recargue el acuífero regional, ya que el nivel subterráneo en esta región susceptible de ser explotado (acuífero) se encuentra aproximadamente a 40 m de profundidad (apartado 3.2.2).

Por otra parte, las entradas de agua subterránea desde niveles subsuperficiales coincide con los periodos en que los niveles de agua en la laguna, han empezado a descender a causa de la evaporación creciente.

Resulta por tanto bastante improbable que el aumento en el volumen de agua de la laguna sea debido unicamente a la precipitación ya que cantidades similares de agua caídas en los meses precedentes no fue suficientes para elevar sus niveles.

En definitiva, es clara una participación de agua subsuperficial en las oscilaciones de la laguna Chica durante el período de tiempo correspondiente al muestreo 8 (Mayo-88), no sólo atendiendo a los niveles piezométricos medidos en ese momento, sino tambien a traves de los resultados del balance hídrico donde este aporte representa un 60% de las entradas totales de agua a la laguna.

Por el contrario, el 10% y 4% de descarga subterránea del muestreo 1 y muestreo 13 respectivamente pueden atribuirse al error inherente a los balances hídricos calculados con términos residuales, como ya se comentó en el apartado 6.2.2.

#### **6.4.2. Evolución geoquímica del agua superficial y subterránea**

Los resultados de los análisis físico-químicos obtenidos en la Laguna Chica y su piezómetro próximo (Apéndice 6.2) fueron representados en diagramas columnares de Collins tal y como se describe en Hem (1989) (Figura 6.8).

La conductividad en la laguna durante el periodo muestreado oscila entre valores de 31,4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (muestreo 8) a 239  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (muestreo 19) de forma inversa al volumen de agua contenido en la cubeta.

Los mayores valores de conductividad, corresponden a los periodos inmediatamente anteriores a su vaciado total, como consecuencia de un aumento en la concentración iónica debido a la evaporación progresiva del agua de la cubeta.

Este mismo tipo de proceso se observa también al comparar los dos ciclos hidrológicos estudiados, ya que la conductividad en el primer año resulta ser menor que en el segundo debido a que mantiene un volumen de agua superior.

TABLA 6.4. Cálculo del coeficiente de infiltración para los periodos de muestreo en que se dispuso de datos del nivel freático en el piezómetro CH (Laguna Chica).

MUESTREO (FECHA)	NUMERO DE DIAS	dh (m)	COEFIC. INFILTRACION K (m/día)
3 (18-III-88)	25	-0.18	$7.2 \cdot 10^{-3}$
4 (29-III-88)	11	-0.03	$2.7 \cdot 10^{-3}$
5 (18-IV-88)	20	-0.01	$5 \cdot 10^{-4}$
9 (3-VII-88)	18	-0.33	$1.8 \cdot 10^{-2}$
10 (19-VII-88)	16	-0.22	$1.3 \cdot 10^{-2}$

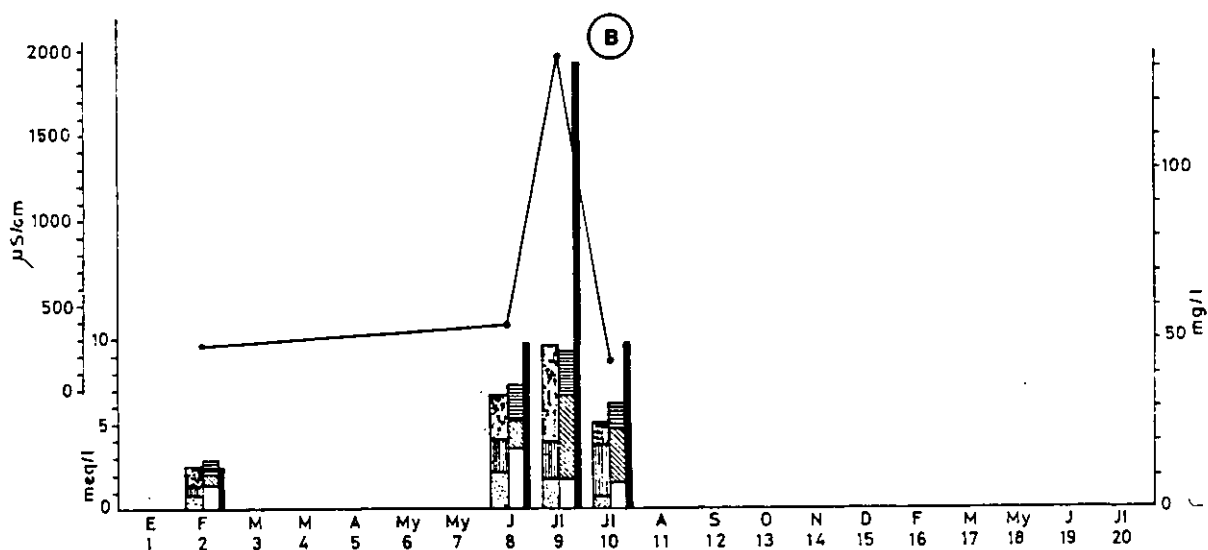
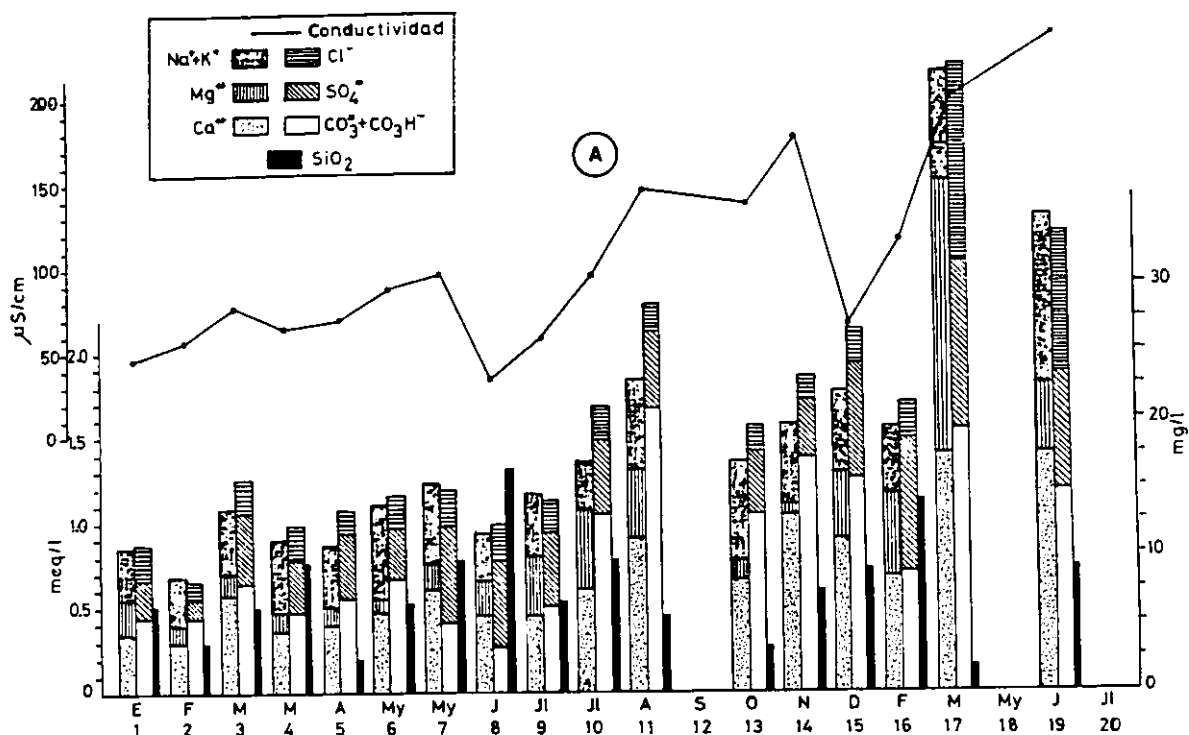


FIGURA 6.8. Variación de la concentración de iones mayoritarios (meq/l), SiO<sub>2</sub> (mg/l) y conductividad (μS/cm) en (A) Laguna Chica y (B) Piezómetro CH durante el periodo muestreado.

Por otro lado, la proporción entre cationes y aniones se mantiene más o menos constante en el tiempo. Hay que exceptuar sin embargo las concentraciones de  $\text{SiO}_2$  que sufren oscilaciones no correlacionadas con las variaciones del volumen de agua.

Teniendo en cuenta que el pH de la laguna se mantiene en un rango muy estrecho (de 5 a 6.5), se trata de un medio poco adecuado para que se produzca la disolución de minerales silicatados o la hidrólisis de los mismos, cuya solubilidad es baja a  $\text{pH} < 9$  (Custodio & Llamas, 1983; Drever, 1988; Hem, 1989). Todo ello hace pensar en una entrada de silicatos vía agua subterránea.

En el piezómetro CH sólo se dispone de datos químicos de 4 muestreos del total de ocho en que se detectó agua. El bajo nivel de agua subterránea registrada durante los muestreos 3, 4, 5 y 13 impidió tomar una muestra de agua suficiente para realizar toda la batería de análisis químicos.

La conductividad y concentración de iones mayoritarios en el piezómetro se mantiene más o menos constante excepto en el muestreo 9, donde la alta concentración de  $\text{SiO}_2$  es probablemente la causa de este aumento drástico de conductividad ( $1.928 \mu\text{S}/\text{cm}$ ).

En la Figura 6.9 se han representado los índices de saturación de los minerales menos solubles y que precipitan por tanto con mayor facilidad en las disoluciones acuosas, esto es, calcita, dolomita y yeso (Eugster & Hardie, 1978).

Se ha incluido el cuarzo y calcedonia ya que en medios acuosos con pH bajos se pueden considerar altamente insolubles.

Tanto el agua recogida en la laguna como en el piezómetro, permanecen subsaturados en minerales carbonatados (calcita y dolomita) y sulfatados (yeso) durante todo su ciclo hídrico.

Mientras que el índice de saturación calculado para el yeso, permanece más o menos constante en el tiempo, los de calcita y dolomita fluctúan en la laguna de forma inversa a su volumen de agua, por lo que puede pensarse en procesos de concentración evaporativa.

En el piezómetro ambos minerales carbonatados presentan un índice de saturación más elevado aunque sin llegar a la sobresaturación durante el muestreo 8, momento en el que el nivel de agua subterránea registrado alcanza su máximo.

Aunque los estudios sobre el paso del agua a través de la zona no saturada del subsuelo son escasos, existen algunas evidencias de que en ocasiones este agua se encuentra más mineralizada que el agua subyacente (Hem, 1989). En nuestro caso, la formación de un pequeño acuífero colgado mediante retención de agua subsuperficial temporalmente puede ocasionar un ligero aumento en la alcalinidad del agua acumulada en estos niveles próximos a la superficie.

Por otro lado, dichas condiciones pueden favorecer el aumento de silicato disuelto en el agua que llega a estar sobresaturada en calcedonia y cuarzo en dichos muestreos.



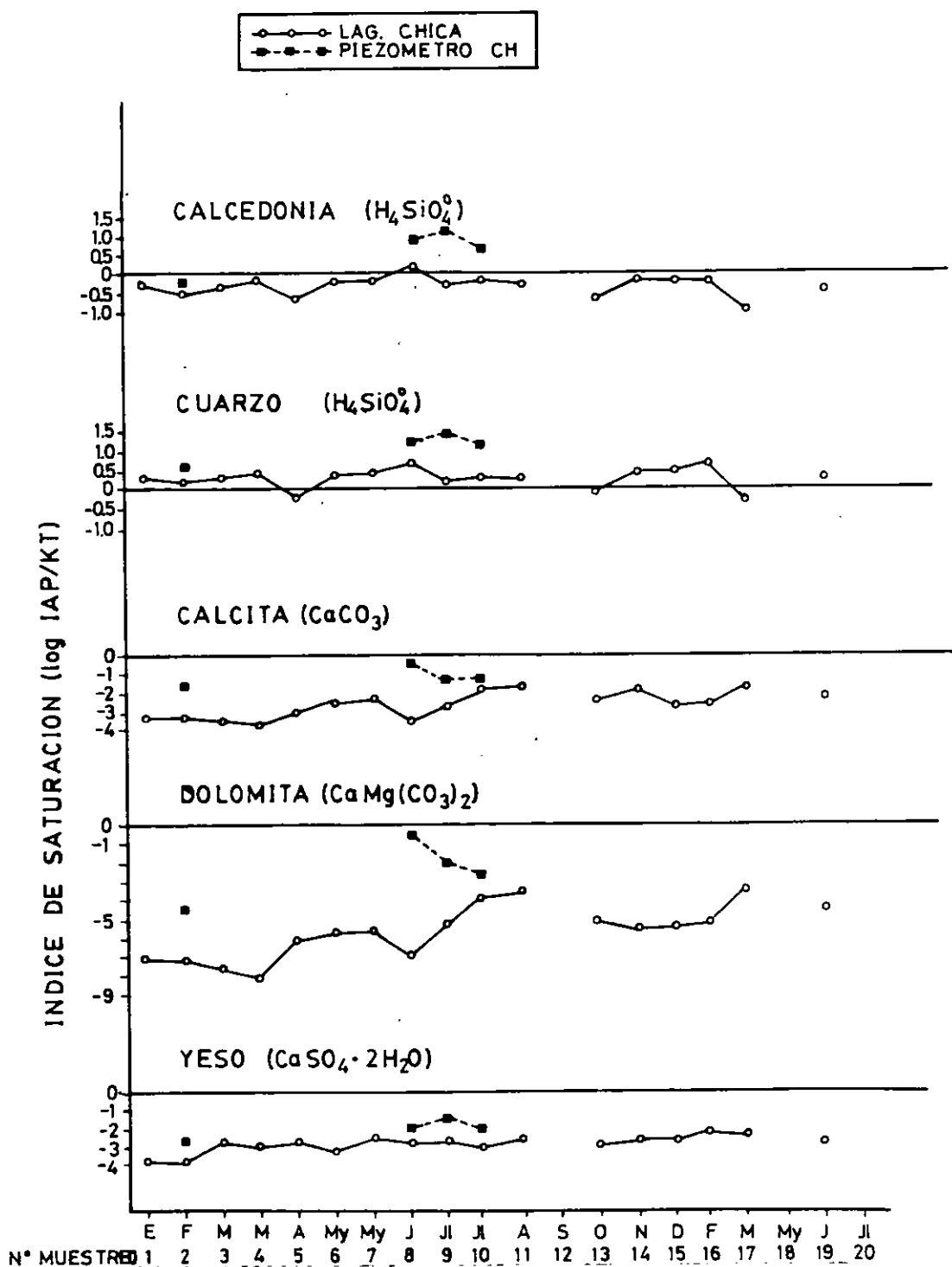


FIGURA 6.9. Indices de saturación de calcedonia, cuarzo, calcita, dolomita y yeso para el agua recogida en la laguna Chica y piezómetro CH de Enero de 1988 a Julio de 1989.

Para el agua de la laguna, la sobresaturación en calcedonia se detecta unicamente en el muestreo 8, lo que puede indicar una entrada del agua subsuperficial en este periodo, que coincidiría además con los resultados obtenidos del balance hídrico.

### **6.5. LAGUNA EPIGENICA DE CUBETA IMPERMEABLE: LAGUNA DELGADA**

#### **6.5.1. Variaciones en los niveles de agua superficial y subterránea. Balance hídrico**

En la Figura 6.10 se representan la evolución de los niveles de la laguna Delgada, el pozo DLP de 6.5 m de profundidad y el piezómetro DL de 1 m de profundidad e instalado más cercano a la orilla de la laguna.

Los niveles de la laguna evolucionaron con un perfil típico de llenado, ligera retención hídrica y progresivo descenso de sus niveles hasta secarse definitivamente en el mes de Agosto de 1988 (muestreo 11). Durante el segundo año no se detectó agua en ninguno de los muestreos, manteniéndose la cubeta con un aspecto seco, muy semejante a su entorno.

El hecho de que el piezómetro DL permaneciera sin agua durante Enero y Febrero de 1988, resulta difícil de explicar a la vista de los niveles piezométricos

registrados en el pozo DLP en este mismo periodo, aunque como es sabido, el comportamiento hidrogeológico de la raña y en general de cualquier material de origen sedimentario, puede variar en puntos próximos por la presencia de intercalaciones de pequeños lentejones de materiales con distinta permeabilidad (Custodio & Llamas, 1983).

Las oscilaciones del nivel freático en el pozo DLP muestran una cierta correlación con el agua superficial y unicamente en el muestreo 1 (Diciembre-1988) el agua subterránea se encontraría por encima del nivel de base de la laguna si el nivel freático se mantuviera perfectamente horizontal. Despues de este momento, la tendencia al descenso en ambos sistemas es notable.

El balance hídrico realizado para esta cubeta (Tabla 6.5) muestra un claro aporte de agua subterránea en el muestreo 1 (Diciembre-1988) mientras que en el resto de muestreos hay una clara tendencia a la infiltración.

El hecho de que la cantidad en  $m^3$  de dicha entrada, supere a todos los valores de infiltración obtenidos y que coincida en el tiempo, con el máximo registrado en el nivel freático, resulta una buena evidencia del valor de los balances hídricos para detectar al menos de forma cualitativa, las entradas de agua subterránea.

La comparación de los resultados obtenidos del balance hídrico, la evolución de niveles piezométricos y precipitación y evaporación directa (Figura 6.11), añade una información valiosa para interpretar el descenso progresivo que se observa en el agua del pozo a lo largo del periodo estudiado.

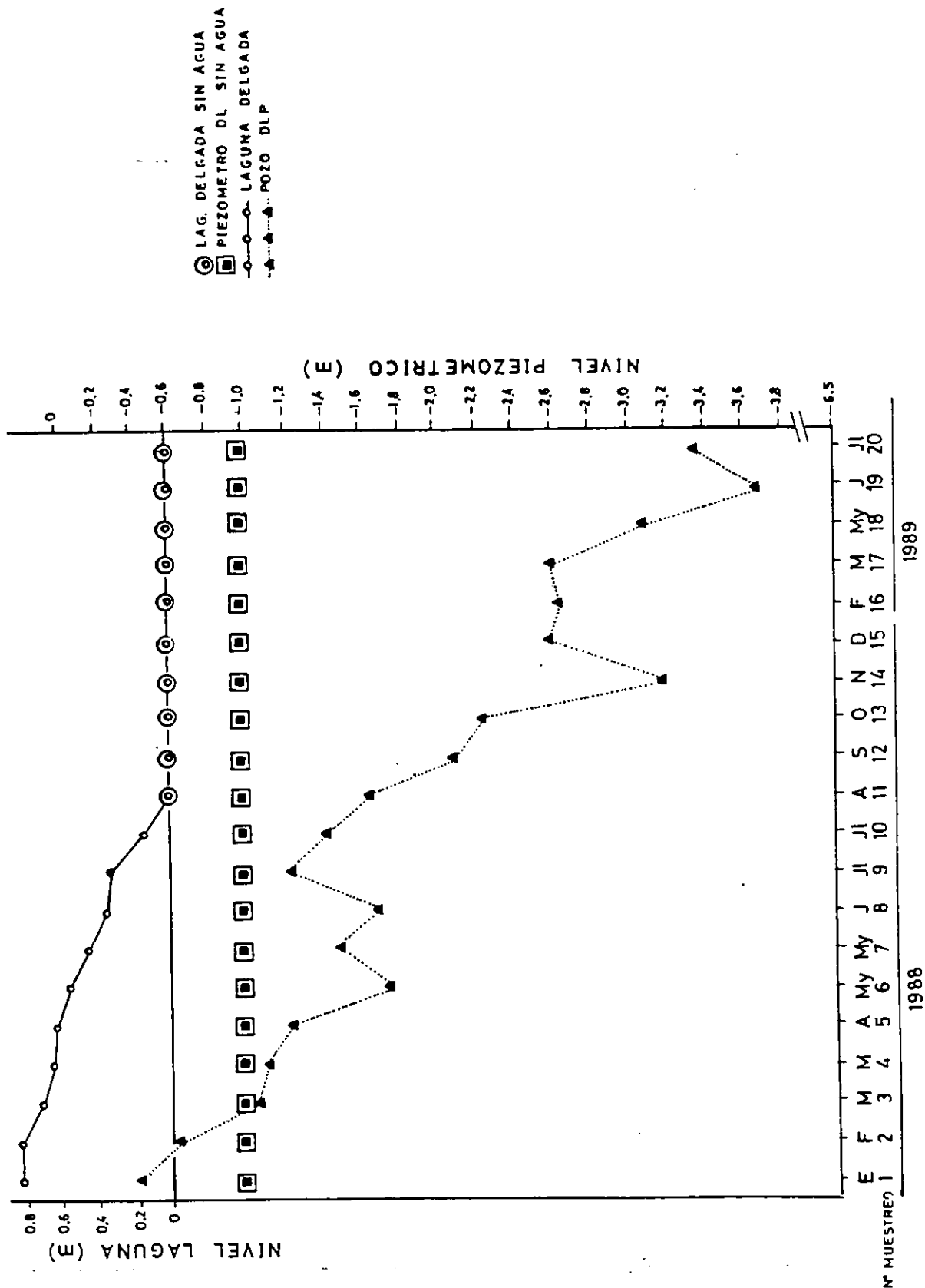


FIGURA 6.10. Oscilación de los niveles de agua registrados en la laguna Delgada, piezómetro DL (1,0 m de profundidad) y pozo DLP (6,5 m de profundidad) durante el periodo de Enero de 1988 a Julio de 1989.

TABLA 6.5. Balance hídrico realizado para la laguna Delgada en el periodo comprendido entre Enero 88 a Julio 89.

MUESTREO	VOLUMEN (m3) (1)	SUPERFIC. (m2) (2)	P (mm) (3)	E (mm) (4)	dV (m3) (5)	P (m3) (6)	E (m3) (7)	S (m3) (8)
1 (30-I-88)	4209.29	12123.63	59.6	41.5	+2308.67	722.6	503.1	+2089.1
2 (21-II-88)	4209.29	12123.63	43.3	33.2	0.00	524.9	402.5	- 122.4
3 (18-III-88)	3110.63	9975.87	1.0	94.6	-1098.66	12.1	943.7	- 167.1
4 (29-III-88)	2633.43	9118.82	1.9	56.0	- 477.20	230.3	511.0	- 196.5
5 (18-IV-88)	2366.36	8005.00	61.0	56.3	- 267.07	739.5	450.6	- 559.9
6 (4-V-88)	1828.09	7185.51	30.4	60.9	- 538.27	368.5	437.6	- 469.2
7 (25-V-88)	1186.55	5635.35	34.7	74.4	- 641.54	420.6	419.2	- 642.9
8 (15-VI-88)	709.23	4034.46	56.6	100.3	- 477.32	686.1	404.6	- 758.8
9 (3-VII-88)	524.50	3364.89	60.6	113.7	- 184.73	734.7	382.5	- 536.9
10 (19-VII-88)	135.96	1741.60	6.7	112.5	- 388.54	81.2	195.9	- 273.6
11 (2-VIII-88)	0.00	0.00	0.0	117.2	- 135.96	0.0	0.0	- 135.9
12 (8-IX-88)	0.00	0.00	0.0	125.7	0.00	0.0	0.0	0.0
13 (26-X-88)	0.00	0.00	71.6	226.7	0.00	868.0	0.0	- 868.0
14 (25-XI-88)	0.00	0.00	30.7	30.3	0.00	372.2	0.0	- 372.2
15 (23-XII-88)	0.00	0.00	18.0	35.6	0.00	218.2	0.0	- 218.2
16 (26-II-89)	0.00	0.00	27.4	74.1	0.00	332.2	0.0	- 332.2
17 (12-III-89)	0.00	0.00	0.8	36.1	0.00	9.7	0.0	- 9.6
18 (22-V-89)	0.00	0.00	90.0	33.0	0.00	1091.1	0.0	-1091.1
19 (7-VI-89)	0.00	0.00	63.6	78.4	0.00	771.0	0.0	- 771.0
20 (18-VII-89)	0.00	0.00	4.5	302.7	0.00	54.5	0.0	- 54.5

- (1) Volumen de la laguna en cada muestreo.  
 (2) Superficie de la laguna en cada muestreo.  
 (3) Precipitación total medida en la estación de Cuatro Vientos para cada muestreo.  
 (4) Evaporación total medida en la estación de Cuatro Vientos para cada muestreo.  
 (5) Variaciones en el volumen de la laguna entre dos muestreos consecutivos.  
 (6) Precipitación directa caída sobre la laguna. Cálculos realizados para una superficie máxima de 12123.63 m2  
 (7) Evaporación de la lámina de agua libre en función de la superficie de cada muestreo.  
 (8) Infiltración (-) o descarga de agua subterránea (+) en la cubeta obtenida como termino residual del balance.

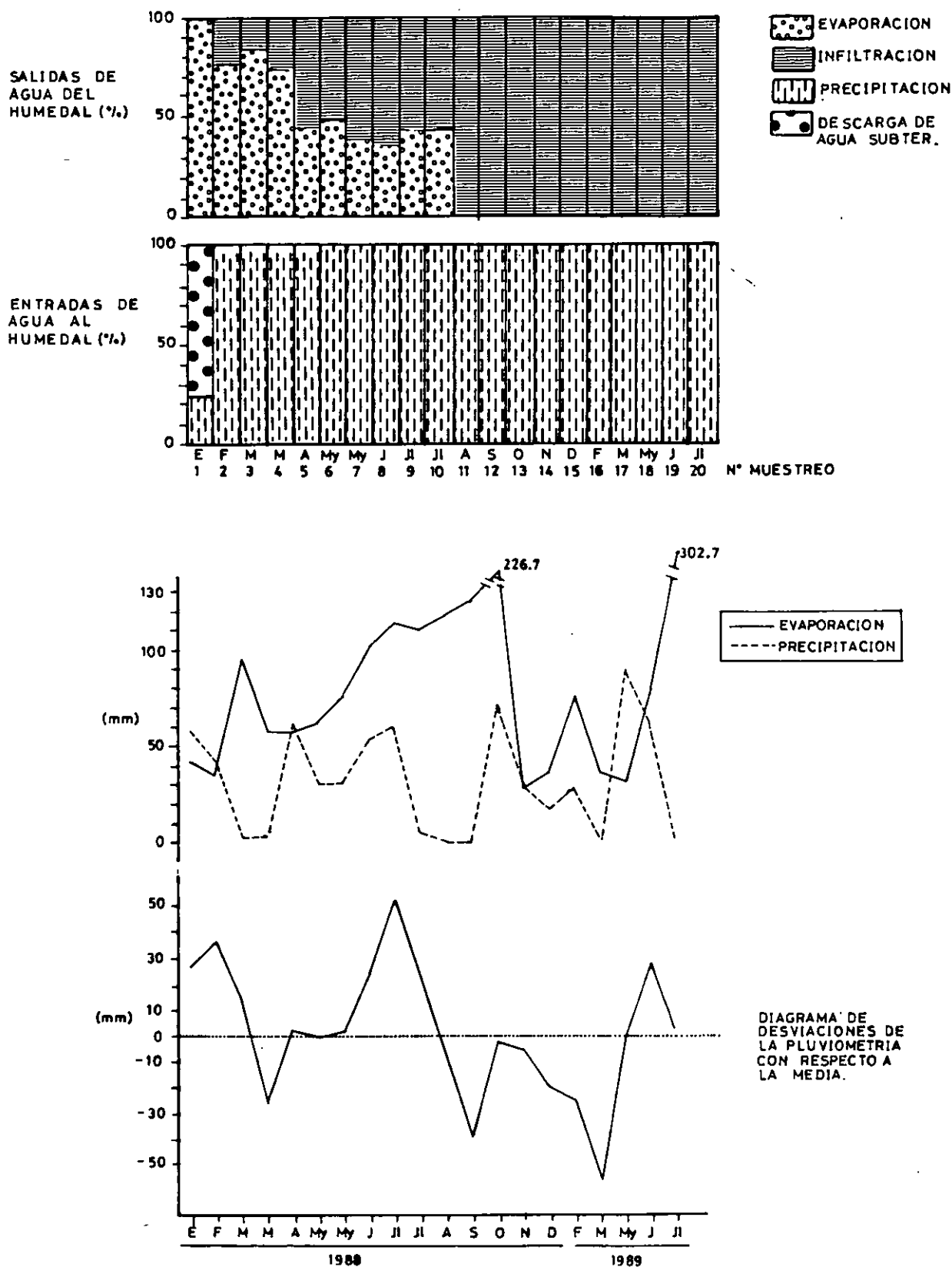


FIGURA 6.11. Porcentajes de entradas y salidas de agua en la laguna Delgada, obtenidos del balance hídrico para cada muestreo. Precipitación y evaporación tomadas de la estación meteorológica de Cuatro Vientos.

Al no existir diferencias significativas en la precipitación atmosférica durante los dos ciclos estudiados, no se puede deducir que la distinta recarga del acuífero en los dos años sucesivos, sea la causa del descenso de aproximadamente 3 m que se detectó en el pozo DLP (Figura 6.10).

Es muy probable que los bombeos crecientes que se están produciendo en la región, estén provocando descensos progresivos en el nivel freático. Aunque no se poseen datos concretos de esta explotación, se han detectado sus efectos negativos sobre humedales de zonas próximas. Este es el caso de las Tablas de Sta. Olalla, humedal citado por Herrera (1987) y que en los últimos años ha permanecido seco, desapareciendo incluso las plantas freatofíticas que lo poblaban. Dicho humedal se encuentra a unos 10 Kms de distancia de la laguna Delgada.

La litología en las proximidades de la laguna Delgada hasta 1 m de profundidad es relativamente homogénea: se trata de arcillas más o menos compactas con permeabilidad baja, aunque no se conoce la estructura litológica del terreno desde esta profundidad hasta 6,5 m, perforación correspondiente al pozo DLP. Los valores del coeficiente de infiltración (K) para dicho pozo (Tabla 6.6) quedan comprendidos entre  $10^{-4}$  y  $10^{-2}$  lo que denota la existencia de materiales limo-arenosos a la profundidad de 6,5 m de características similares a las descritas para la laguna Chica en el apartado 6.4.1. de este capítulo.

El nivel freático medido en otros pozos cercanos a la laguna Delgada, se sitúa a unos 10 m de profundidad

y teniendo en cuenta que dichos pozos tienen una profundidad de obra en torno a 30 m, cabe interpretarse para esta zona la presencia de un acuífero colgado independiente del regional y detectado a través de los niveles de agua medidos en el pozo DLP.

La proximidad entre dicho nivel de agua subterránea y el acuífero regional, hace suponer una influencia directa entre ambos, de forma que la descarga regional del acuífero de Madrid en este área se produce en niveles acuíferos más superficiales.

Por ello, descensos en el nivel regional, influirán en la recarga del acuífero que mantiene los niveles de agua en la laguna Delgada, impidiendo que ésta última se infiltre rápidamente.

Por otro lado, entradas puntuales de agua subsuperficial en la laguna, pueden producirse esporádicamente, siempre que las condiciones hidrometeorológicas lo permitan.

La bajada de los niveles acuíferos regionales en los últimos años debido presumiblemente a explotación abusiva de los recursos subterráneos, impide que dicho acuífero colgado, se recargue de forma que pueda servir de soporte al agua de la laguna.

#### **6.5.2. Evolución geoquímica de agua superficial y subterránea.**

En el Apéndice 6.2 figuran los resultados de los



**TABLA 6.6. Cálculo del coeficiente de infiltración para los períodos de muestreo en que se dispuso de datos del nivel freático en el pozo DLP (Laguna Delgada).**

MUESTREO (FECHA)	NUMERO DE DIAS	dh (m)	COEFIC. DE INFILTRAC K (m/día)
1 (30-I-88)	39	+0.26	$6 \cdot 10^{-3}$
2 (21-II-88)	21	-0.22	$1 \cdot 10^{-2}$
3 (18-III-88)	25	-0.36	$1.4 \cdot 10^{-2}$
4 (29-III-88)	11	-0.08	$7.2 \cdot 10^{-3}$
5 (18-IV-88)	20	-0.13	$6.5 \cdot 10^{-3}$
6 (4-V-88)	16	-0.53	$3.3 \cdot 10^{-2}$
7 (25-V-88)	21	+0.26	$1.2 \cdot 10^{-2}$
8 (15-VI-88)	21	-0.2	$9.5 \cdot 10^{-3}$
9 (3-VII-88)	18	+0.45	$2.5 \cdot 10^{-2}$
10 (19-VII-88)	16	-0.17	$1 \cdot 10^{-2}$
11 (2-VIII-88)	14	-0.23	$1.6 \cdot 10^{-2}$
12 (8-IX-88)	37	-0.45	$1.2 \cdot 10^{-2}$
13 (26-X-88)	49	-0.15	$3 \cdot 10^{-3}$
14 (25-XI-88)	30	-0.76	$2.5 \cdot 10^{-2}$
15 (23-XII-88)	28	+0.59	$2.1 \cdot 10^{-2}$
16 (26-II-89)	65	-0.04	$6 \cdot 10^{-4}$
17 (12-III-89)	14	+0.04	$2.8 \cdot 10^{-3}$
18 (22-V-89)	41	-0.48	$1.1 \cdot 10^{-2}$
19 (7-V-89)	15	-0.6	$4 \cdot 10^{-2}$
20 (18-VII-89)	72	+0.43	$5.9 \cdot 10^{-3}$

análisis físico-químicos realizados para las muestras de agua recogidas en la laguna Delgada y en el pozo próximo DLP.

La conductividad de la laguna Delgada durante el periodo de tiempo que estuvo inundada se mantuvo con pocas oscilaciones con mínimos de 41  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el muestreo 1 (Enero 88) y máximo en 158  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el muestreo 3 (marzo 88) (Figura 6.12), debidas fundamentalmente a fenómenos de concentración evaporativa.

Los diagramas de Collins realizados para el agua de dicha laguna (Figura 6.12), reflejan este mismo fenómeno en las pequeñas variaciones registradas en la concentración iónica medida, advirtiéndose una composición iónica bicarbonatado sódica en todos los muestreos.

Por su parte, la concentración de  $\text{SiO}_2$  adquiere unos valores elevados en el muestreo 1 que no vuelven a aparecer a lo largo de todo el periodo. Al igual que ocurría en la laguna Chica, no puede pensarse en una disolución de minerales silicatados a pH tan bajo como el que posee la laguna Delgada (5,5 en el muestreo 1). Cabe pensar por tanto en la entrada de agua subsuperficial o subterránea como responsable del aumento de silicatos disueltos en el agua superficial.

La concentración iónica detectada en el agua subterránea del pozo DLP (Figura 6.12), sufre algunas oscilaciones que pueden interpretarse como efecto del agua de lluvia cuando llega a la zona saturada. En efecto, durante el primer ciclo estudiado se manifiestan variaciones de la conductividad del agua

que responden basicamente al efecto de la recarga, cuya respuesta es más rápida si la superficie freática está próxima a la superficie del terreno. Sin embargo, en el segundo año, donde la profundidad del nivel freático es considerable, la recarga tiene una respuesta más indirecta en la conductividad del agua subterránea.

El anormal descenso de la conductividad del pozo registrado en el muestreo 3, se debe probablemente a la retirada de iones mayoritarios de la disolución acuosa al precipitar en el muestreo anterior (Figura 6.13).

El hecho de que el agua subterránea posea valores de conductividad unas 50 veces mayores que las detectadas en el agua superficial pone en evidencia la presencia de un acuífero colgado ya mencionado en el apartado anterior donde descargan las aguas del acuífero regional con salinidad medio-alta, descrita para esta región (Rubio, 1984) y con una composición iónica fundamentalmente clorurada.

Dicha composición iónica medida en el pozo, se mantiene constante a lo largo del tiempo, al igual que la cantidad de  $\text{SiO}_2$  disuelto según muestran los diagramas de Collins de la Figura 6.12.

En la Figura 6.13 se han representado los índices de saturación de los minerales menos solubles y por tanto aquellos que precipitarán con más facilidad.

Con respecto a los minerales silicatados (cuarzo y calcedonia) en el pozo se mantienen sobresaturados durante todo el periodo y es en el muestreo 2, cuando aumenta considerablemente el índice de saturación. No ocurre igual en la laguna, donde el máximo valor de

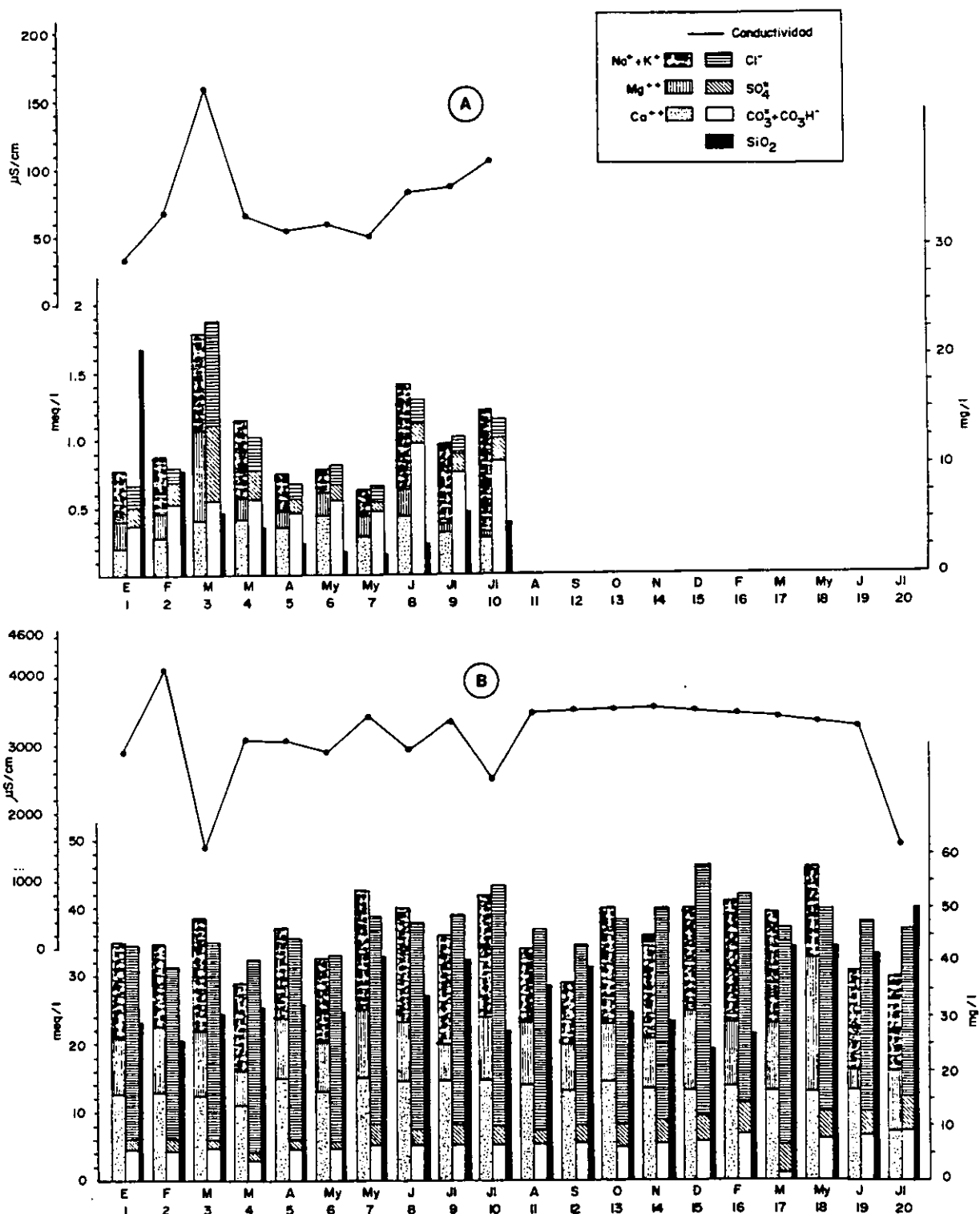


FIGURA 6.12. Variación de la concentración de iones mayoritarios (meq/l),  $\text{SiO}_2$  (mg/l) y conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ ) en (A) Laguna Delgada y (B) Pozo DLP durante el periodo muestreado.

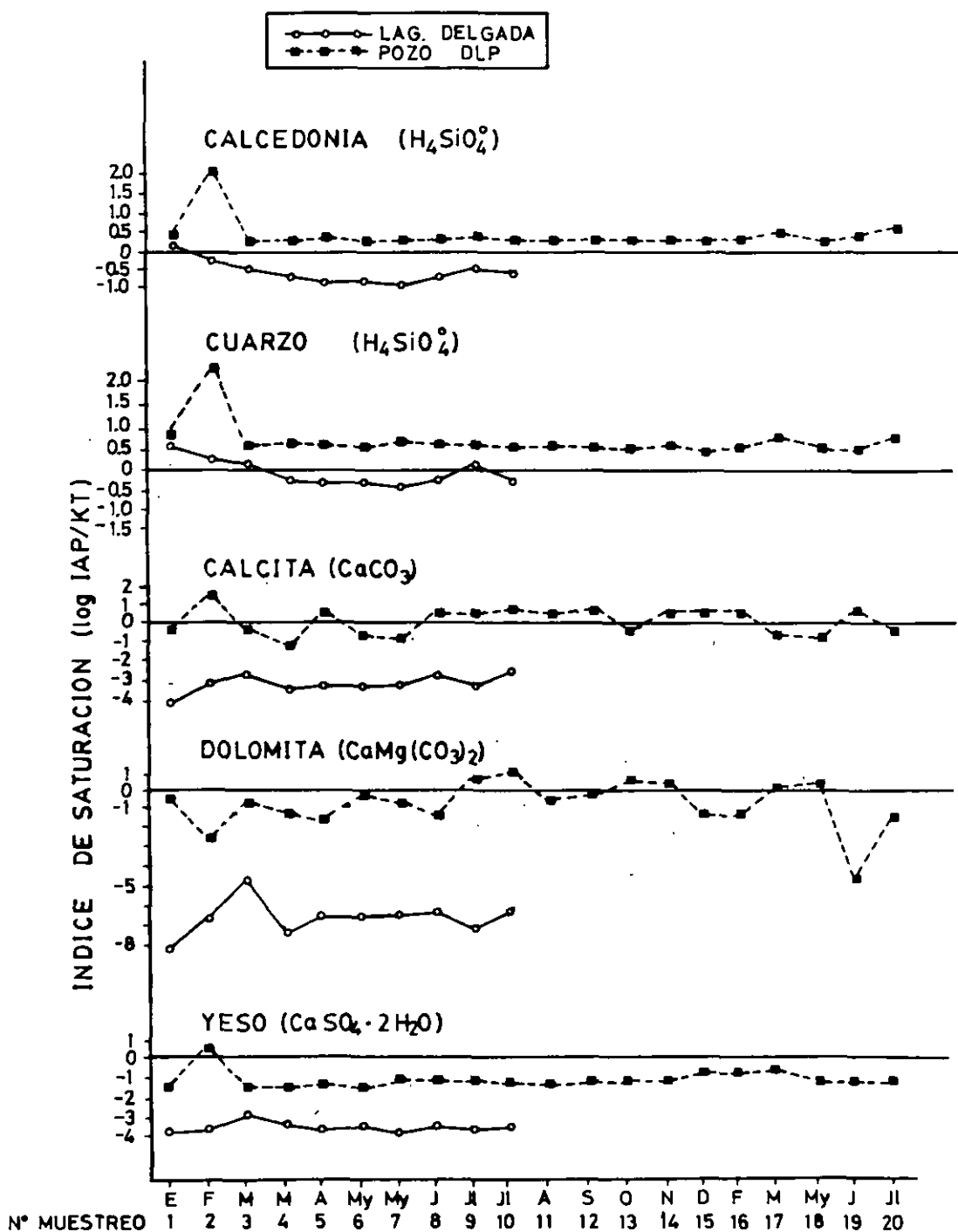


FIGURA 6.13. Indices de saturación de calcedonia, cuarzo, calcita, dolomita y yeso para el agua recogida en la laguna Delgada y pozo DLP de Enero de 1988 a Julio de 1989.

este índice se registra en el muestreo 1, debido posiblemente a una entrada de agua subsuperficial cargada en silicatos. El hecho de que el agua subterránea medida en el pozo, registre el aumento de silicatos despues que el medido en la laguna, pone de manifiesto la recarga del acuífero colgado durante ese período, que adquiere silicatos al atravesar la capa no saturada según los mecanismos de hidrólisis ya comentados.

Los minerales carbonatados (calcita y dolomita) y sulfatados (yeso), se mantienen en equilibrio en la disolución del agua de la laguna, no encontrándose en ningún momento sobresaturada en ninguno de ellos.

La mayor concentración iónica del agua subterránea, ocasiona en ciertos momentos la precipitación de alguno de los tres minerales, sobre todo de calcita y dolomita que varían inversamente, una con respecto a la otra en función de la mayor o menor concentración de  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  respectivamente.

La identificación de una entrada de agua subterránea a la laguna, a traves de los datos químicos en el muestreo 1, coincide con las interpretaciones efectuadas para el balance hídrico y el hecho de que unicamente en dicho muestreo el nivel del agua subterránea medida en el pozo sobrepasará el nivel de base de la laguna.

Este hecho, junto a la interpretación dada para el aumento de silicatos en el pozo durante el muestreo 2, pone de manifiesto, que el agua que entra en la laguna es subsuperficial y la función del agua subterránea más profunda, unicamente es la de soportar o mantener esta

escorrentía superficial de forma que no se infiltre rápidamente. Se trataría por tanto de un funcionamiento de características análogas al descrito para la laguna Chica.

## ***6.6. LAGUNA HIPOGENICA DE FLUJOS REGIONALES ALCALINOS: OJO DEL BRAVO***

### **6.6.1. Variación en los niveles de agua superficial y subterránea. Balance hídrico**

Los niveles de agua registrados en Ojo del Bravo y en su piezómetro próximo evolucionan muy paralelos en el tiempo considerado (Figura 6.14). En prácticamente todos los muestreos, los niveles de agua subterránea permanecen por encima del nivel de base de la laguna, excepto en el muestreo 12 (Agosto-1988). También hay que destacar que el nivel freático se encuentra en casi todos los casos por encima del nivel del agua superficial, así como de la superficie del terreno, lo que es prueba para muchos autores de una clara descarga de agua subterránea (Siegel & Glaser, 1987).

El período en que la laguna mantiene estable su volumen de agua se prolonga 6 meses (de Diciembre a Mayo de 1988), mientras que el tiempo en que la cubeta permanece sin agua es sólo de un mes (Septiembre-88).

Los resultados del balance hídrico (Tabla 6.7)

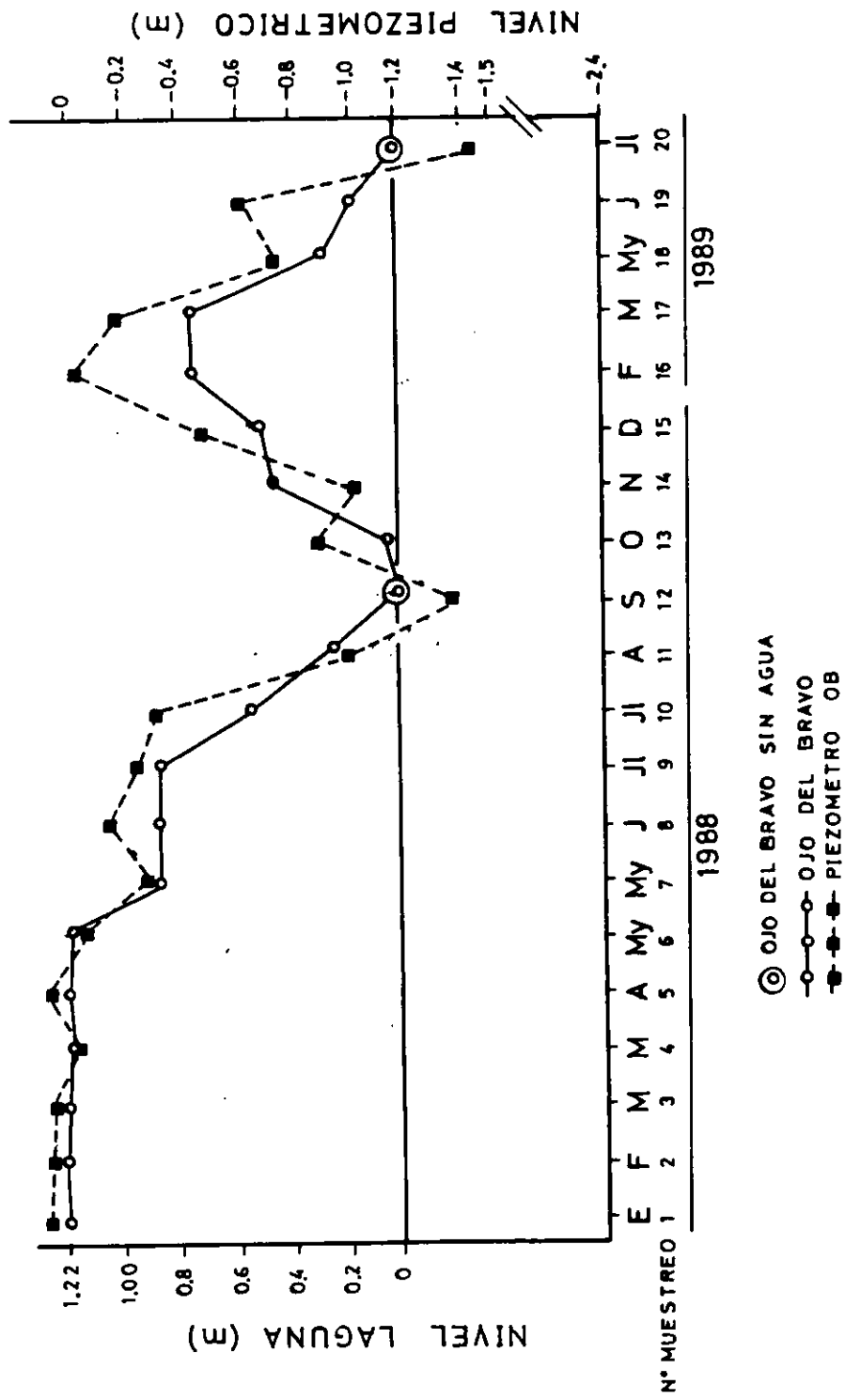


FIGURA 6.14. Oscilación de los niveles de agua registrados en el Ojo del Bravo y piezómetro OB (2,4 m de profundidad) durante el periodo de Enero de 1988 a Julio de 1989.



TABLA 6.7. Balance hídrico realizado para el Ojo del Bravo en el periodo comprendido entre Enero 88 a Julio 89.

MUESTREO	VOLUMEN (m3) (1)	SUPERFIC. (m2) (2)	P (mm) (3)	E (mm) (4)	dV (m3) (5)	P (m3) (6)	E (m3) (7)	S (m3) (8)
1 (30-I-88)	43.63	60.57	59.6	41.5	0.00	3.60	2.51	- 1.09
2 (21-II-88)	43.63	60.57	43.3	33.2	0.00	2.62	2.01	- 0.61
3 (18-III-88)	43.63	60.57	1.0	94.6	0.00	0.06	5.72	+ 5.66
4 (29-III-88)	41.15	60.10	1.9	56.0	- 2.48	0.11	3.36	+ 0.77
5 (18-IV-88)	43.63	60.57	61.0	56.3	+ 2.48	3.69	3.41	+ 2.20
6 (4-V-88)	41.88	59.71	30.4	60.9	- 1.75	1.84	3.63	+ 0.04
7 (25-V-88)	24.74	57.09	34.7	74.4	-17.14	2.10	4.24	-15.00
8 (15-VI-88)	23.55	55.10	56.6	100.3	- 1.19	3.42	5.52	+ 3.29
9 (3-VII-88)	23.55	55.10	60.6	113.7	0.00	3.67	6.26	+ 2.59
10(19-VII-88)	8.89	32.36	6.7	112.5	-14.66	0.40	3.64	-11.42
11(2-VIII-88)	1.19	9.54	0.0	117.2	- 7.70	0.00	1.11	- 6.59
12(8-IX-88)	0.00	0.00	0.0	125.7	- 1.19	0.00	0.00	- 1.19
13(26-X-88)	0.30	6.30	71.6	226.7	+ 0.30	4.33	1.42	- 2.61
14(25-XI-88)	6.68	27.10	30.7	30.3	+ 6.38	1.85	0.82	+ 5.35
15(23-XII-88)	7.28	30.70	18.0	35.6	+ 0.60	1.09	1.09	- 0.60
16(26-II-89)	15.22	46.01	27.4	74.1	+ 7.94	1.65	3.40	+ 9.69
17(12-III-89)	15.02	46.92	0.8	36.1	- 0.20	0.04	1.69	+ 1.45
18(22-V-89)	2.78	19.52	90.0	33.0	-12.24	5.45	0.64	-17.05
19(7-VI-89)	1.05	8.92	63.6	78.4	- 1.73	3.85	0.69	- 4.89
20(18-VII-89)	0.00	0.00	4.5	302.7	- 1.05	0.27	0.00	- 1.32

- (1) Volumen de la laguna en cada muestreo.
- (2) Superficie de la laguna en cada muestreo.
- (3) Precipitación total medida en la estación de Cuatro Vientos para cada muestreo.
- (4) Evaporación total medida en la estación de Cuatro Vientos para cada muestreo.
- (5) Variaciones en el volumen de la laguna entre dos muestreos consecutivos.
- (6) Precipitación directa caída sobre la laguna. Cálculos realizados para una superficie máxima de 60.57 m2
- (7) Evaporación de la lámina de agua libre en función de la superficie de cada muestreo.
- (8) Infiltración (-) o descarga de agua subterránea (+) en la cubeta obtenido como término residual del balance.

ponen de relieve que durante los muestreos 3 (Marzo-88); 4 (Marzo-88); 5 (Abril-88); 6 (Mayo-88); 8 (Junio-88); 9 (Julio-88); 14 (Noviembre-88); 16 (Febrero-89) y 17 (Marzo-89) se produce descarga de agua subterránea en el humedal.

Asimismo, se observa en la Tabla 6.7, como la cantidad de infiltración estimada tiene en general unos valores bajos, así como la descarga de agua subterránea sobre la laguna, en ambos casos próximos a cero, con lo que estos resultados deben tomarse con precaución.

En la comparación efectuada entre los porcentajes de entradas y salidas de agua al humedal obtenidos del balance hídrico y precipitación y evaporación directa (Figura 6.15) se observa como no existe una relación directa entre los máximos de pluviometría acumulada y las entradas de agua subterránea, aunque éstas sí coinciden con los valores máximos de evaporación. El nivel freático sí acusa rápidamente la recarga procedente del agua de lluvia.

Se puede generalizar que la descarga de agua subterránea al humedal se produce cuando el nivel freático se encuentra por encima del nivel de agua de la laguna coincidiendo con periodos del año en que la evaporación no es muy intensa, esto es, en invierno y primavera. Aunque después de años algo lluviosos, pueden producirse descargas en los meses estivales como ocurre en el año 1988, debido a la inercia adquirida por el sistema subterráneo.

Según esto, es probable que las entradas de agua subterránea se produzcan más frecuentemente de lo que resulta del cálculo del balance hídrico.

Los coeficientes de infiltración calculados a partir de las variaciones en el piezómetro (Tabla 6.8) muestran unos valores que corresponden a un material limo-arenoso (Custodio & Llamas, 1983) como se pudo comprobar *in situ* en la perforación realizada al instalar el piezómetro OB (Figura 6.16)

A partir de 1,8 m de profundidad el material comienza a ser de grano más grueso, con menor proporción de arcilla, aunque los valores de K encontrados hacen pensar en que la proporción de arcilla vuelve a ser elevada a partir de 2,4 m.

La descarga más o menos continuada a lo largo del año en la laguna, la existencia de niveles freáticos por encima de la superficie del terreno, así como los valores del coeficiente de infiltración, sugieren una situación hidrológica diferente a las vistas en las dos lagunas precedentes, pertenecientes al tipo genético-funcional epigénico. En el ojo del Bravo el agua subterránea inmediatamente próxima, está íntimamente relacionada con el acuífero regional, cuya descarga se manifiesta claramente en superficie en el mantenimiento de los niveles hídricos del humedal.

#### **6.6.2. Evolución geoquímica de agua superficial y subterránea.**

Los resultados de los análisis físico-químicos del ojo del Bravo y de su piezómetro próximo OB (Apéndice 6.2) se han utilizado para elaborar los diagramas

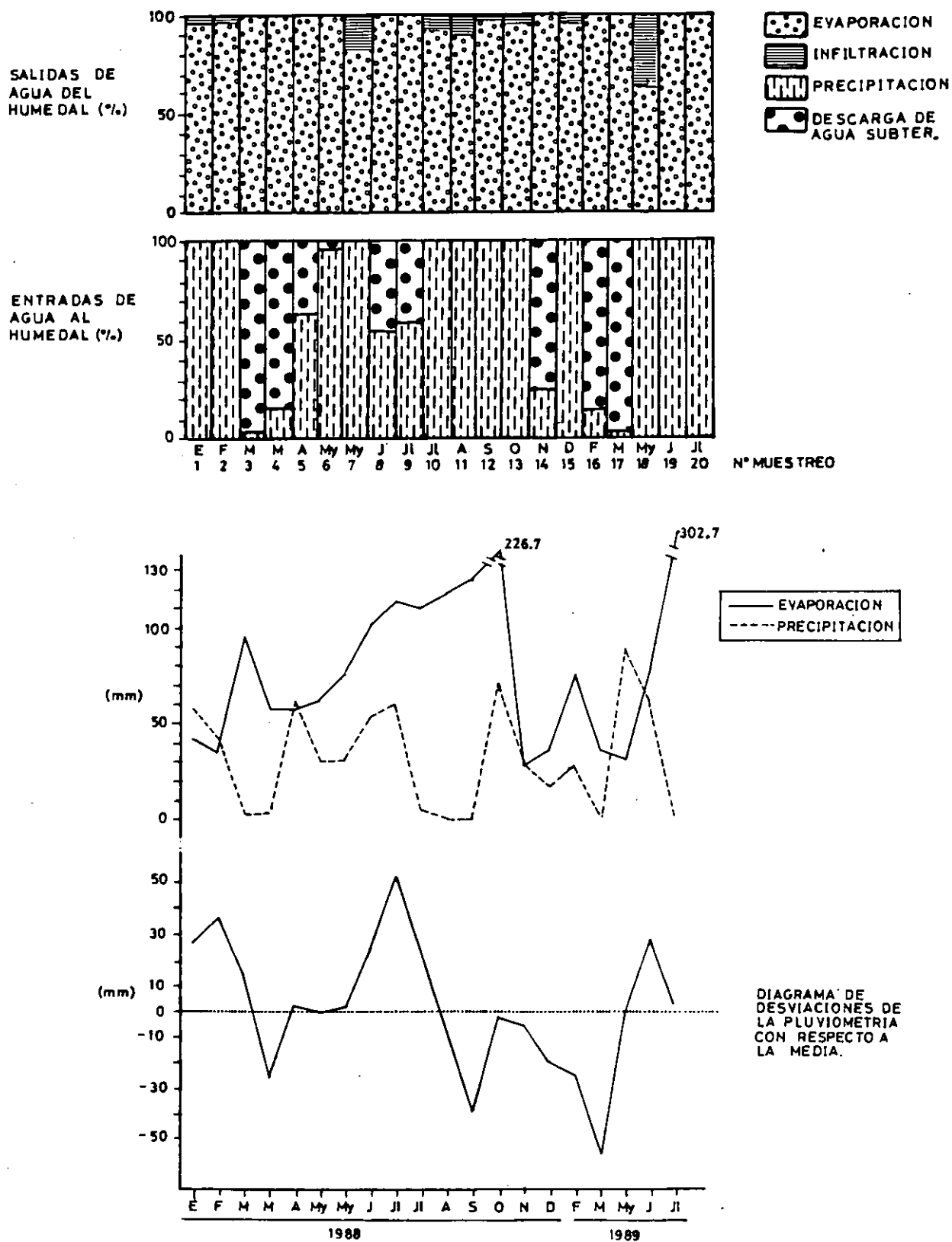


FIGURA 6.15. Porcentajes de entradas y salidas de agua en el ojo del Bravo obtenidos del balance hídrico para cada muestreo. Precipitación y evaporación tomadas de la estación meteorológica de Cuatro Vientos.

**TABLA 6.8. Cálculo del coeficiente de infiltración para los periodos de muestreo en que se dispuso de datos del nivel freático en el piezómetro OB (Ojo del Bravo).**

MUESTREO (FECHA)	NUMERO DE DIAS	dh (m)	COEFIC. INFILTRACION K (m/día)
1 (30-I-88)	39	-0.02	$5 \cdot 10^{-4}$
2 (21-II-88)	21	-0.01	$4 \cdot 10^{-4}$
3 (18-III-88)	25	-0.01	$4 \cdot 10^{-4}$
4 (29-III-88)	11	-0.08	$7 \cdot 10^{-4}$
5 (18-IV-88)	20	+0.09	$4 \cdot 10^{-4}$
6 (4-V-88)	16	-0.09	$5.6 \cdot 10^{-3}$
7 (25-V-88)	21	-0.27	$1.2 \cdot 10^{-2}$
8 (15-VI-88)	21	+0.17	$8 \cdot 10^{-3}$
9 (3-VII-88)	18	-0.11	$6 \cdot 10^{-3}$
10 (19-VII-88)	16	-0.06	$3.7 \cdot 10^{-3}$
11 (2-VIII-88)	14	-0.73	$5.2 \cdot 10^{-2}$
12 (8-IX-88)	37	-0.36	$9.7 \cdot 10^{-3}$
13 (26-X-88)	49	+0.50	$1 \cdot 10^{-2}$
14 (25-XI-88)	30	-0.18	$6 \cdot 10^{-3}$
15 (23-XII-88)	28	+0.58	$2 \cdot 10^{-2}$
16 (26-II-89)	65	+0.44	$6 \cdot 10^{-3}$
17 (12-III-89)	14	-0.15	$1 \cdot 10^{-2}$
18 (22-V-89)	41	-0.56	$1.3 \cdot 10^{-2}$
19 (7-V-89)	15	+0.12	$8 \cdot 10^{-3}$
20 (18-VII-89)	72	-0.84	$1.1 \cdot 10^{-2}$

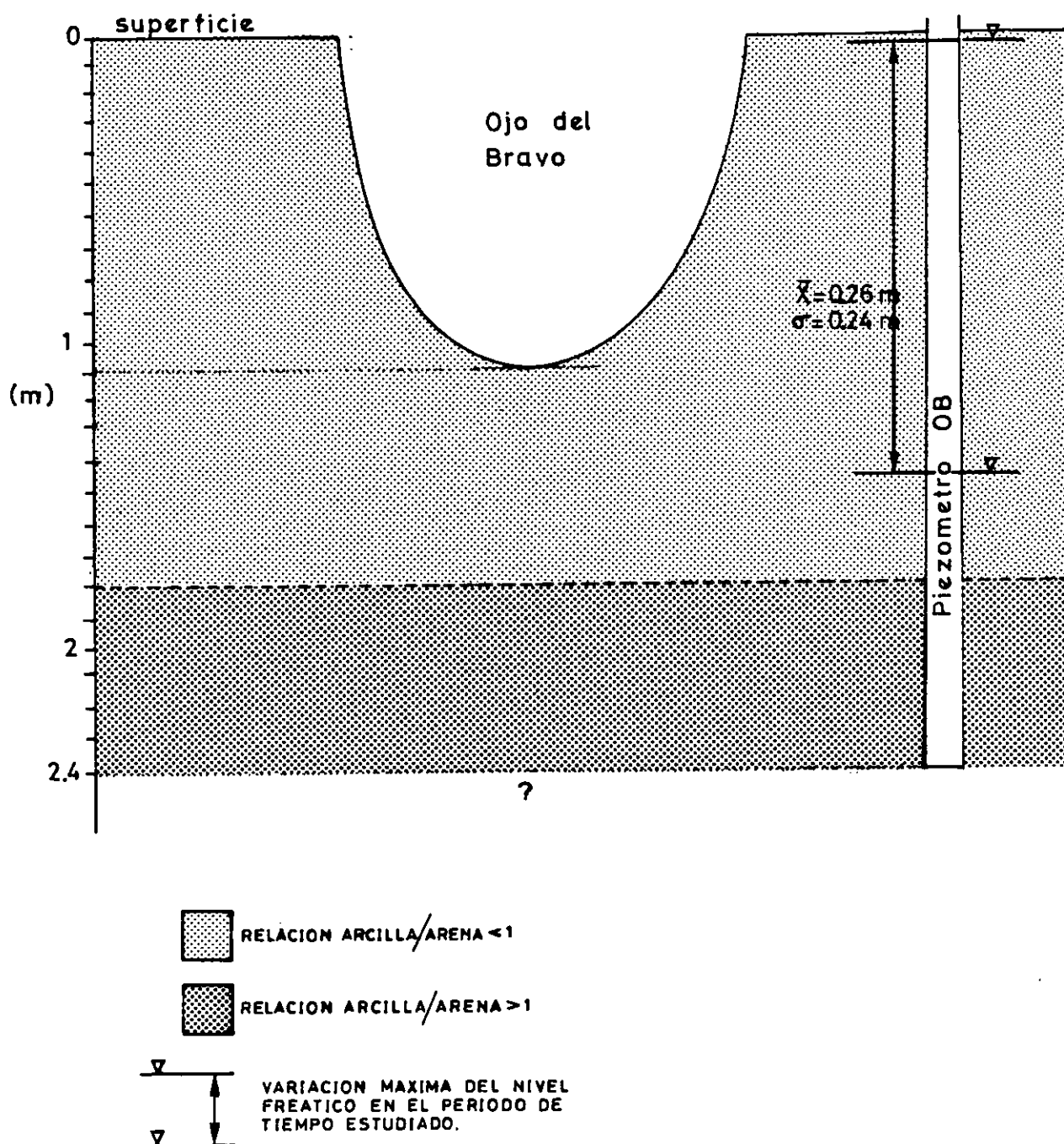


FIGURA 6.16. Perfil litológico esquemático en las proximidades de Ojo del Bravo

columnares de Collins que aparecen en la Figura 6.17.

En el ojo del Bravo, la concentración iónica (expresada en términos de conductividad) se mantiene relativamente constante a lo largo del tiempo y no se ve incrementada en los períodos previos a la desecación estival, por fenómenos de concentración evaporativa.

Sin embargo, la composición iónica varía a lo largo del año, desde bicarbonatada cálcica en la primavera-verano de 1988 a bicarbonatada sódica en invierno de 1988 y 1989 y clorurada sódica de Marzo a Junio de 1989.

La concentración de  $\text{SiO}_2$  sufre pequeños aumentos en determinados momentos del ciclo, fundamentalmente antes de secarse y cuando se está comenzando a llenar.

En el agua subterránea analizada procedente del piezómetro OB, las variaciones de conductividad son más acentuadas que en la laguna, variando la composición iónica entre bicarbonatada cálcica, bicarbonatada sódica y clorurada sódica.

La observación en las oscilaciones en el contenido del  $\text{SiO}_2$  en el agua subterránea, permite comprobar que los máximos valores coinciden con los encontrados para la laguna y ambos se producen en el periodo estival.

Hay que hacer notar, que dichos aumentos de sílice en agua superficial y subterránea coinciden aproximadamente con los períodos en que se producía infiltración desde la cubeta, según los resultados obtenidos en los balances hídricos.

La representación de los índices de saturación de los minerales menos solubles (Figura 6.18) pone en evidencia la alta correlación en la evolución del agua de la laguna y la subterránea detectada en el piezómetro.

Mientras que los valores del índice de saturación para los minerales silicatados (calcedonia y cuarzo) se mantienen sobresaturados en el agua superficial y subterránea durante todo el periodo estudiado, evolucionando en ambos sistemas de forma sincrónica, para el yeso permanecen más o menos constantes y subsaturados y para los minerales carbonatados (calcita y dolomita) estos índices alternan los valores positivos y negativos para diferentes periodos.

La observación conjunta de estas oscilaciones con los cambios en la composición iónica que se producen tanto en el agua superficial como subterránea pone de manifiesto la existencia de dos procesos químicos combinados que permiten la identificación de la relación directa existente entre el agua subterránea y superficial en este enclave.

Por un lado, el fenómeno de intercambio iónico o cambio de bases, que se produce por la presencia de  $\text{Na}^+$  en el agua procedente de flujos de largo recorrido descritos para este área del acuífero de Madrid (Rubio, 1984), se ve favorecido por las oscilaciones en la concentración de  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  y por el juego de precipitación-disolución, puesto de manifiesto por la evolución de los índices de saturación de calcita y dolomita.

En general, el cambio entre cationes dominantes en



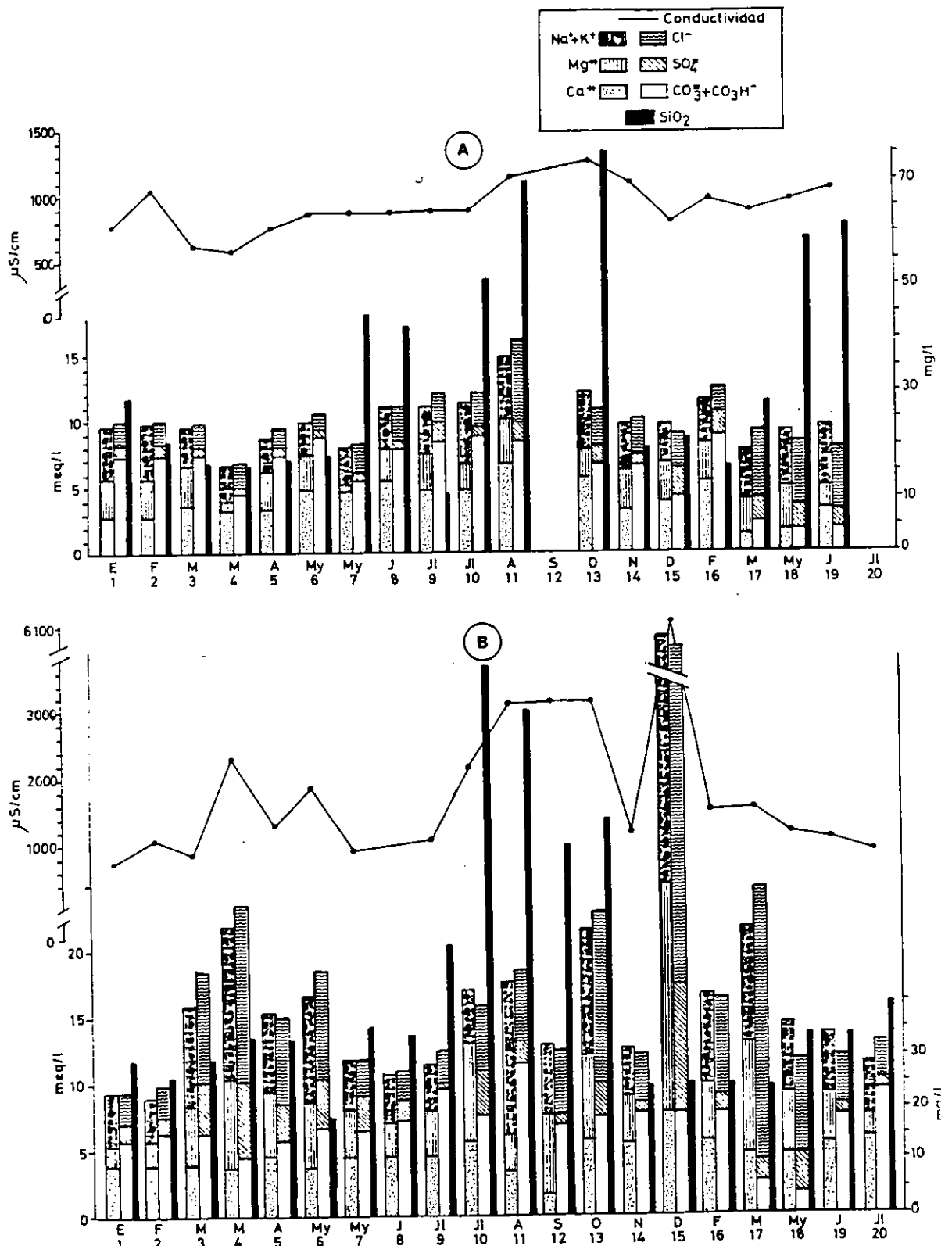


FIGURA 6.17. Variación de la concentración de iones mayoritarios (meq/l),  $\text{SiO}_2$  (mg/l) y conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en (A) Ojo del Bravo. (B) Piezómetro OB durante el periodo muestreado.

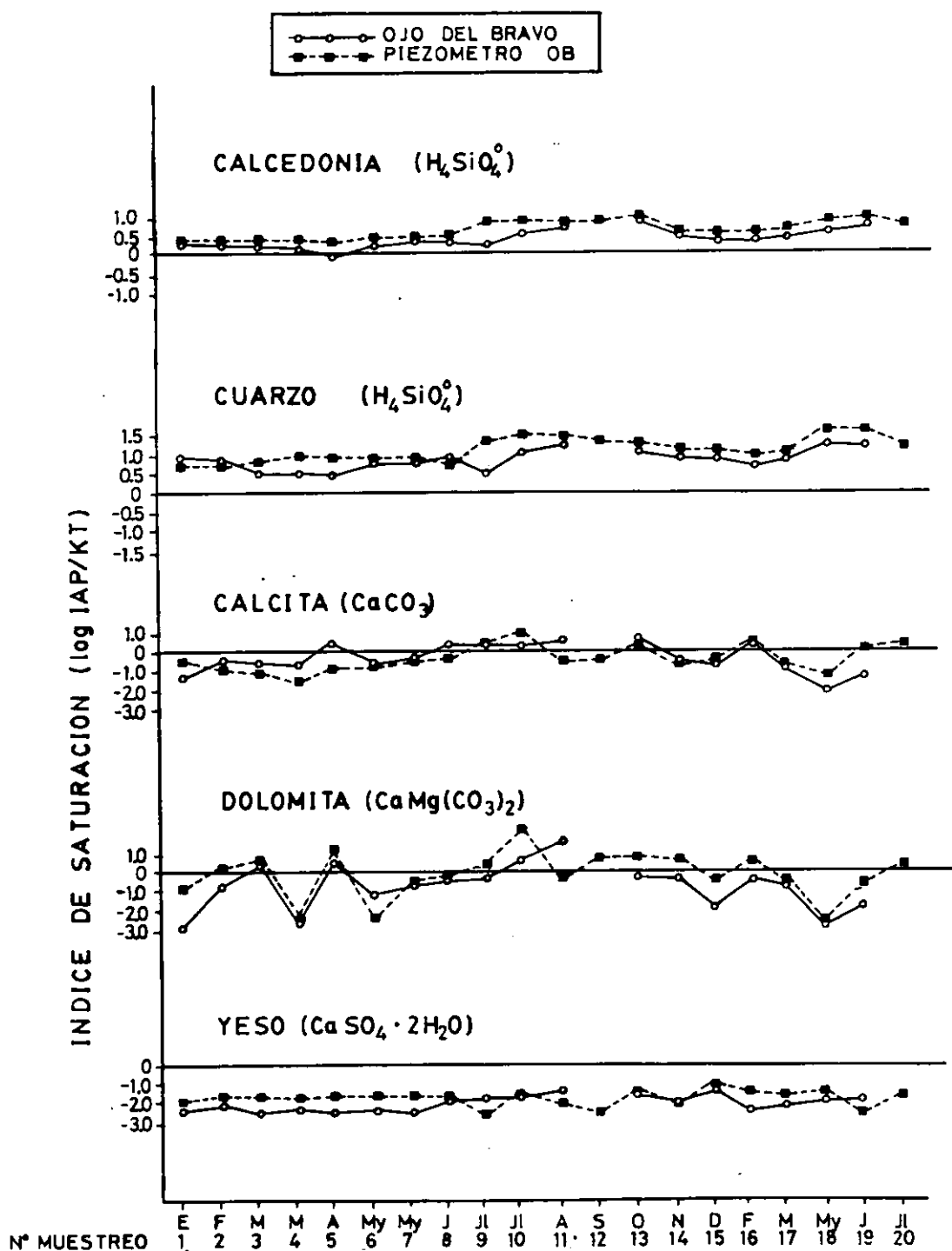


FIGURA 6.18. Indices de saturación de calcedonia, cuarzo, calcita, dolomita y yeso para el agua recogida en el Ojo del Bravo y piezómetro OB de Enero de 1988 a Julio de 1989.

el agua del piezómetro ( $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Na}^+$ ) coincide con el paso de una composición catiónica de  $\text{Na}^+$  a  $\text{Ca}^{++}$  en el humedal y viceversa, lo que refleja una íntima relación entre agua superficial y subterránea de entrada y salida en ambos sentidos.

El aumento de  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  en el agua subterránea próxima al humedal debido presumiblemente a infiltración directa desde la cubeta, provoca una precipitación de calcita y dolomita al sobresaturarse el agua en estos iones, que se retiran del agua, favoreciendo de esta forma el ablandamiento del agua, al aumentar la concentración de  $\text{Na}^+$  disuelto.

Por otro lado, la aparición de  $\text{Na}^+$  como catión dominante en el agua de la laguna, se produce unicamente como reflejo de los procesos que se están desarrollando en el agua subterránea y favorecido por la precipitación de minerales carbonatados que retiran grandes cantidades de  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  que se encontraban disueltos.

No tiene sentido, por tanto, pensar en una entrada mayoritaria de agua subsuperficial, como ocurría en la laguna Chica y laguna Delgada, anteriormente descritas sino que es la descarga de flujos relativamente mineralizados del acuífero regional, los que se manifiestan en superficie.

## **6.7. LAGUNA HIPOGENICA DE FLUJOS REGIONALES MIXTOS: LAGUNA DE LAS TORRES.**

### **6.7.1. Variación de los niveles de agua superficial y subterránea. Balances hídricos.**

Los niveles de agua que aparecen representados en la Figura 6.19 corresponden a los registrados en el canal de drenaje de la laguna de las Torres, excavado con una profundidad de 0,15 m. y que mantuvo agua con pequeñas oscilaciones en el nivel durante casi todo el período estudiado ya que las fluctuaciones de nivel en la laguna son prácticamente imperceptibles por encontrarse parcialmente desecada.

Igualmente se registraron los niveles de agua subterránea en el centro de la cubeta a través del piezómetro TOC y en la orilla mediante el piezómetro TO (Figura 6.19).

Las épocas en que el canal permaneció seco corresponden a los meses de Mayo, Julio, Agosto, Septiembre de 1988 y Mayo, Junio y Julio de 1989. En todas estas ocasiones, se produjeron descensos en los niveles del agua subterránea medidos tanto en el centro de la laguna como en la orilla. En todas las medidas realizadas, el piezómetro TOC mantuvo sus niveles por encima del nivel de base del canal de drenaje y en muchas de ellas también se encontró por encima de la superficie del terreno. Todo ello son claros indicios de flujos de agua que descargan en la cubeta (Siegel &

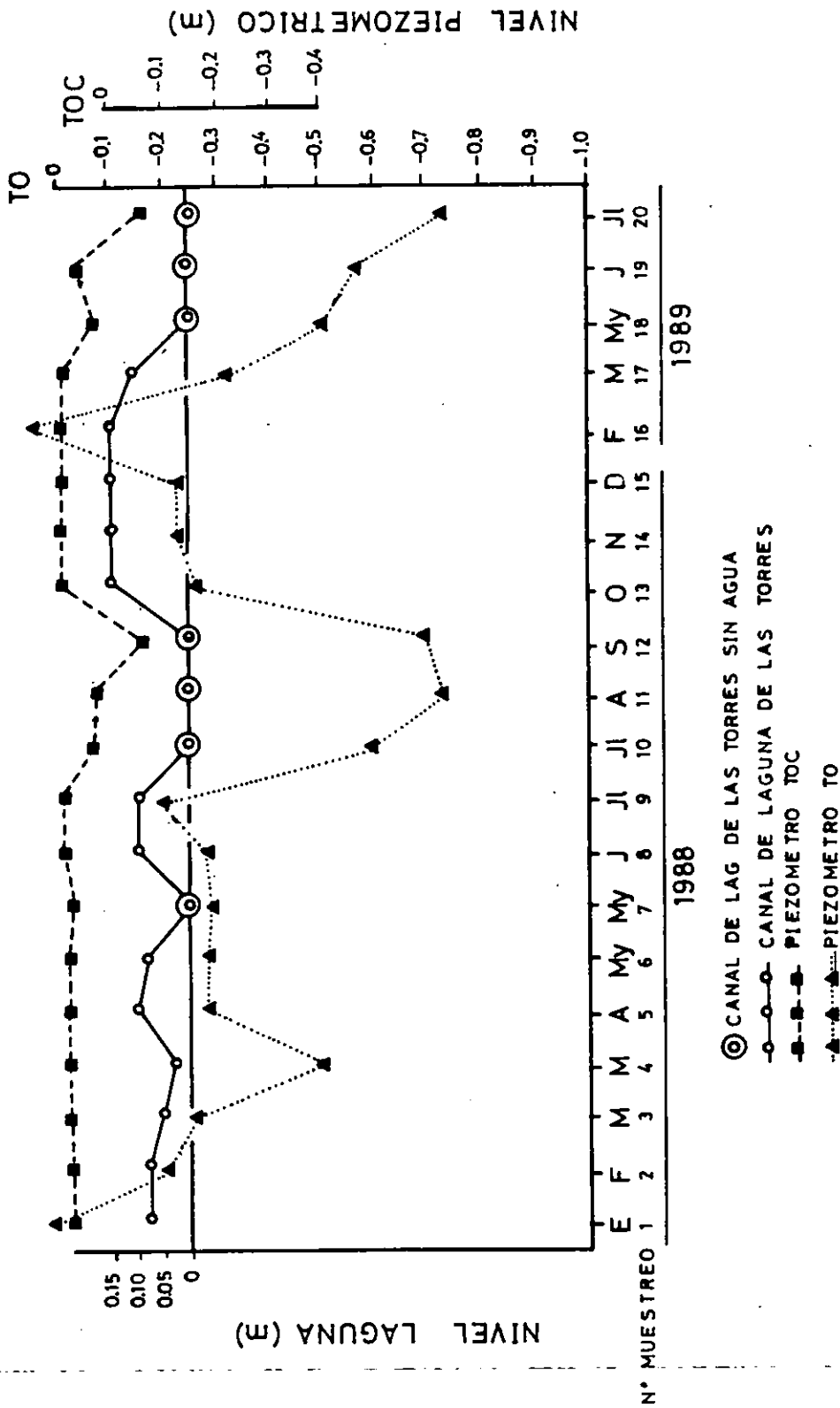


FIGURA 6.19. Oscilación de los niveles registrados en el canal de drenaje de la laguna de las Torres, piezómetro situado en el centro de la laguna TOC (0,4 m de profundidad) y piezómetro TO de la orilla (1,0 m de profundidad).

Glaser, 1987) y que la mantienen encharcada gran parte del año a pesar del drenaje artificial a que se ve sometida.

Dadas las circunstancias peculiares de esta laguna, se han realizado dos balances hídricos diferentes: en el primer caso, se ha considerado que la profundidad del canal correspondía a la profundidad de la laguna durante cada muestreo y se ha calculado a partir de los datos batimétricos el volumen de agua que podría contener (Tabla 6.9). En el segundo caso se ha hecho un balance hídrico exclusivamente para el canal de drenaje, considerándolo como una "minicubeta" independiente del resto de la laguna (Tabla 6.10).

Aunque la tasa de evaporación en lagunas saladas es menor que en lagunas dulces (Langbein, 1961; Hammer, 1986), se ha utilizado para la realización de los balances hídricos en la laguna de las Torres los datos proporcionados por la estación meteorológica de Cuatro Vientos, sin aplicar ningún factor de corrección para aguas mineralizadas.

Los muestreos en que el agua subterránea descarga en la laguna prácticamente coinciden en los dos balances. El flujo de agua que descarga en superficie, aunque fluctúa a lo largo del año, nunca llega a ser cero, pues incluso en los meses de sequía se mantiene un flujo subsuperficial puesto de manifiesto por el grado de humedad que mantienen los sedimentos de dicho canal, incluso en la estación seca. Se puede pensar en una subestimación del componente superficial del balance, puesto que en los cálculos del balance no ha intervenido la salida superficial de agua debida al efluente.

De hecho, el alto porcentaje de infiltración registrado en algunos de los muestreos (Figura 6.20), parece más bien que debería interpretarse como salida de agua del sistema a través del canal de drenaje, ya que la saturación constante del terreno impide la infiltración.

La comparación de los niveles piezométricos y la lluvia y evaporación directa (Figura 6.20) proporciona una evidencia de que el agua subterránea en el fondo de la cubeta y en la orilla se comportan de forma aparentemente distinta.

El nivel del agua en el piezómetro TOC permanece más o menos constante salvo en algunos periodos de sequía prolongada como el caso del muestreo 12. Es por tanto, menos sensible a la recarga debida a la precipitación. Al haber interceptado flujos de agua subterránea que descargan directamente en la cubeta, las oscilaciones estacionales temporales son menos acusadas como corresponde, por otro lado a áreas de descarga netas (Custodio & Llamas, 1983) (Figura 6.21).

El piezometro TO sin embargo mantiene unas oscilaciones mayores (Figura 6.21) y de forma más o menos paralelas a la precipitación atmosférica, al mantenerse próximo a la superficie del terreno.

Los valores de K calculado para el piezometro TO (Tabla 6.11) son del mismo orden de magnitud que los de otros humedales estudiados. En efecto, materiales limo-arenosos se encontraron a partir de 15 cms de profundidad, bajo un estrato de arenas más gruesas (Figura 6.21).

TABLA 6.9. Balance hídrico realizado para la laguna de las Torres en el periodo comprendido entre Enero 88 a Julio 89.  
 suponiendo su profundidad equivalente a la del canal de drenaje.

MUESTREO	VOLUMEN (m3) (1)	SUPERFIC. (m2) (2)	P (mm) (3)	E (mm) (4)	dV (m3) (5)	P (m3) (6)	E (m3) (7)	S (m3) (8)
1 (30-I-88)	26.92	1132	59.6	41.5	-20.00	119.2	46.97	-92.23
2 (21-II-88)	26.92	1132	43.3	33.2	0.00	86.6	37.58	-49.02
3 (18-III-88)	4.33	1132	1.0	94.6	-22.60	2.0	107.8	+83.20
4 (29-III-88)	1.73	1132	1.9	56.0	- 2.60	3.8	63.43	+57.03
5 (18-IV-88)	46.92	1132	61.0	56.3	+45.20	122.0	63.73	-13.07
6 (4-V-88)	26.92	1132	30.4	60.9	-20.00	60.8	68.90	-11.99
7 (25-V-88)	0.00	0	34.7	74.4	-26.90	69.4	0.00	-96.30
8 (15-VI-88)	46.92	1132	56.6	100.3	+46.90	113.2	113.53	+47.23
9 (3-VII-88)	46.92	1132	60.6	113.7	0.00	121.2	128.70	+ 7.50
10(19-VII-88)	0.00	0	6.7	112.5	-46.90	13.4	0.00	-60.30
11(2-VIII-88)	0.00	0	0.0	117.2	0.00	0.0	0.00	0.00
12(8-IX-88)	0.00	0	0.0	125.7	0.00	0.0	0.00	0.00
13(26-X-88)	108.64	2000	71.6	226.7	+108.60	143.2	453.4	+418.80
14(25-XI-88)	127.77	2000	30.7	30.3	+19.13	61.4	60.6	+18.33
15(23-XII-88)	108.64	2000	18.0	35.6	-19.13	36.0	71.2	+16.07
16(26-II-89)	127.77	2000	27.4	74.1	+19.13	54.8	148.2	+112.53
17(12-III-89)	66.91	1132	0.8	36.1	-60.80	1.6	40.86	-21.54
18(22-V-89)	0.00	0	90.0	33.0	-66.90	180.0	0.00	-246.95
19(7-VI-89)	0.00	0	63.6	78.4	0.00	127.2	0.00	-127.20
20(18-VII-89)	0.00	0	4.5	302.7	0.00	9.0	0.00	- 9.00

- (1) Volumen de la laguna en cada muestreo.
- (2) Superficie de la laguna en cada muestreo.
- (3) Precipitación total medida en la estación de Cuatro Vientos para cada muestreo.
- (4) Evaporación total medida en la estación de Cuatro Vientos para cada muestreo.
- (5) Variaciones en el volumen de la laguna entre dos muestreos consecutivos.
- (6) Precipitación directa caída sobre la laguna. Cálculos realizados para una superficie máxima de 2000 m2
- (7) Evaporación de la lámina de agua libre en función de la superficie de cada muestreo.
- (8) Infiltración (-) o descarga de agua subterránea (+) en la cubeta obtenida como termino residual del balance.



TABLA 6.10. Balance hídrico del canal de drenaje de la laguna de las Torres para el periodo comprendido entre Enero 88 a Julio 89.

MUESTREO	VOLUMEN (m3) (1)	dV (m3) (2)	P (m3) (3)	E (m3) (4)	S (m3) (5)
1 (30-I-88)	7.79	-0.87	5.16	3.59	- 2.44
2 (21-II-88)	7.79	0.00	3.74	2.87	- 0.87
3 (18-III-88)	4.33	-3.46	0.08	8.19	+ 4.65
4 (29-III-88)	1.73	-2.60	0.16	4.85	+ 2.09
5 (18-IV-88)	8.66	+6.90	5.28	4.87	+ 6.49
6 (4-V-88)	7.79	-0.87	2.63	5.27	+ 1.77
7 (25-V-88)	0.00	-7.79	3.00	0.00	-10.79
8 (15-VI-88)	8.66	+8.66	4.90	8.68	+12.44
9 (3-VII-88)	8.66	0.00	5.24	9.84	+ 4.60
10 (19-VII-88)	0.00	-8.66	0.58	0.00	- 9.24
11 (2-VIII-88)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12 (8-IX-88)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13 (26-X-88)	12.99	+12.99	6.20	19.63	+25.72
14 (25-XI-88)	12.99	0.00	2.65	2.62	- 0.03
15 (23-XII-88)	12.99	0.00	1.55	3.08	+ 1.53
16 (26-II-89)	12.99	0.00	2.37	6.41	+ 4.04
17 (12-III-89)	9.52	-3.47	0.07	3.12	- 0.41
18 (22-V-89)	0.00	-9.52	7.79	0.00	-17.31
19 (7-VI-89)	0.00	0.00	5.50	0.00	- 5.50
20 (18-VII-89)	0.00	0.00	0.38	0.00	- 0.38

(1) Volumen del canal en cada muestreo.

(2) Variaciones en el volumen del canal.

(3) Precipitación total directa caída sobre el canal. Calculos realizados para una superficie máxima de 86.6 m2

(4) Evaporación total de la lámina de agua libre en función de la superficie de cada muestreo.

(5) Infiltración (-) o descarga de agua subterránea (+) en la cubeta.

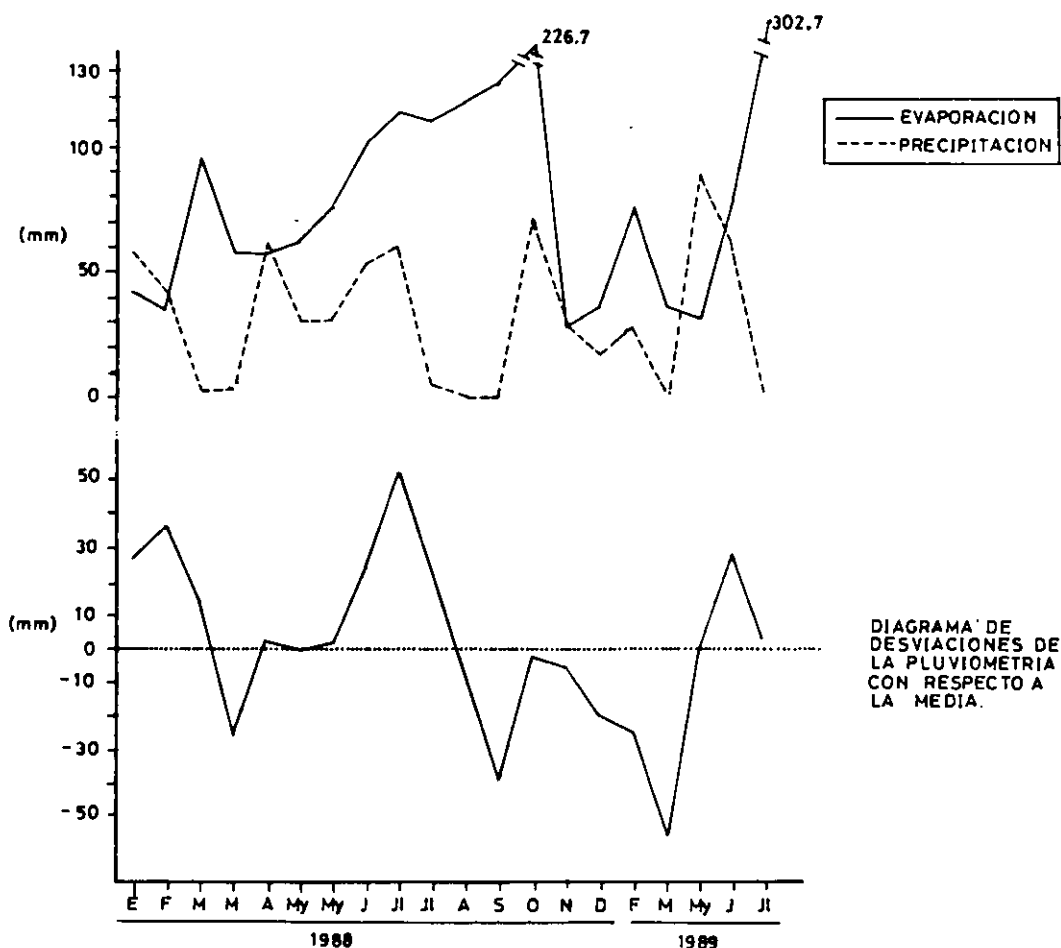
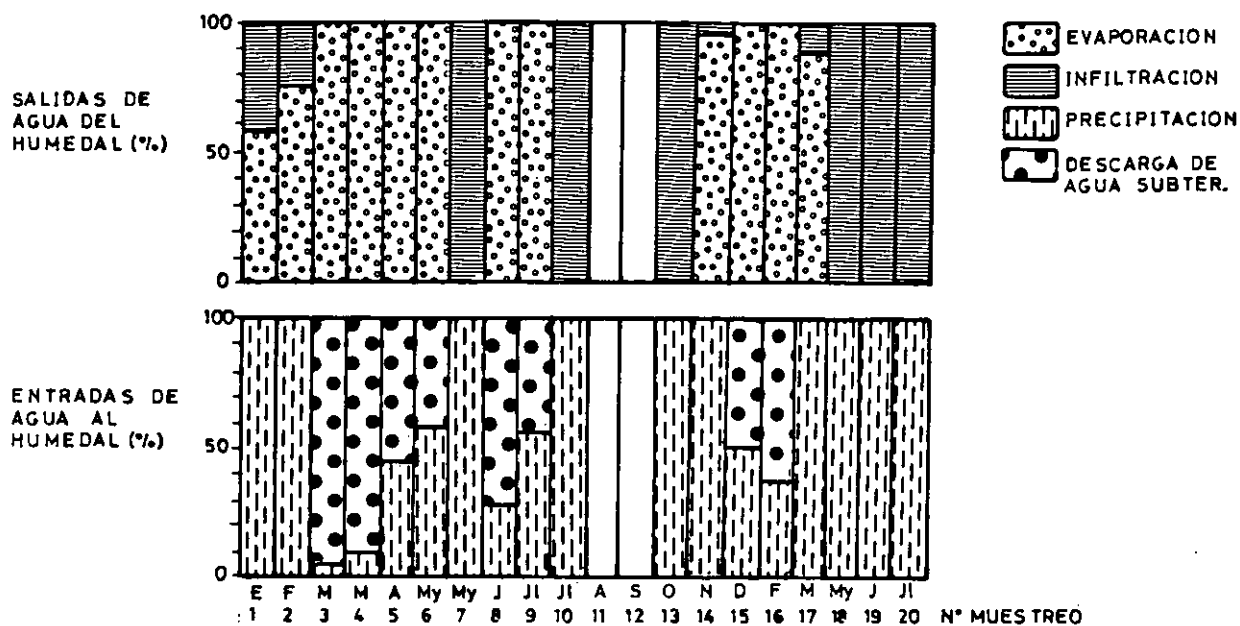


FIGURA 6.20. Porcentajes de entradas y salidas del agua en la laguna de las Torres, obtenidos del balance hídrico para cada muestreo. Precipitación y evaporación tomadas de la estación meteorológica de Cuatro Vientos.

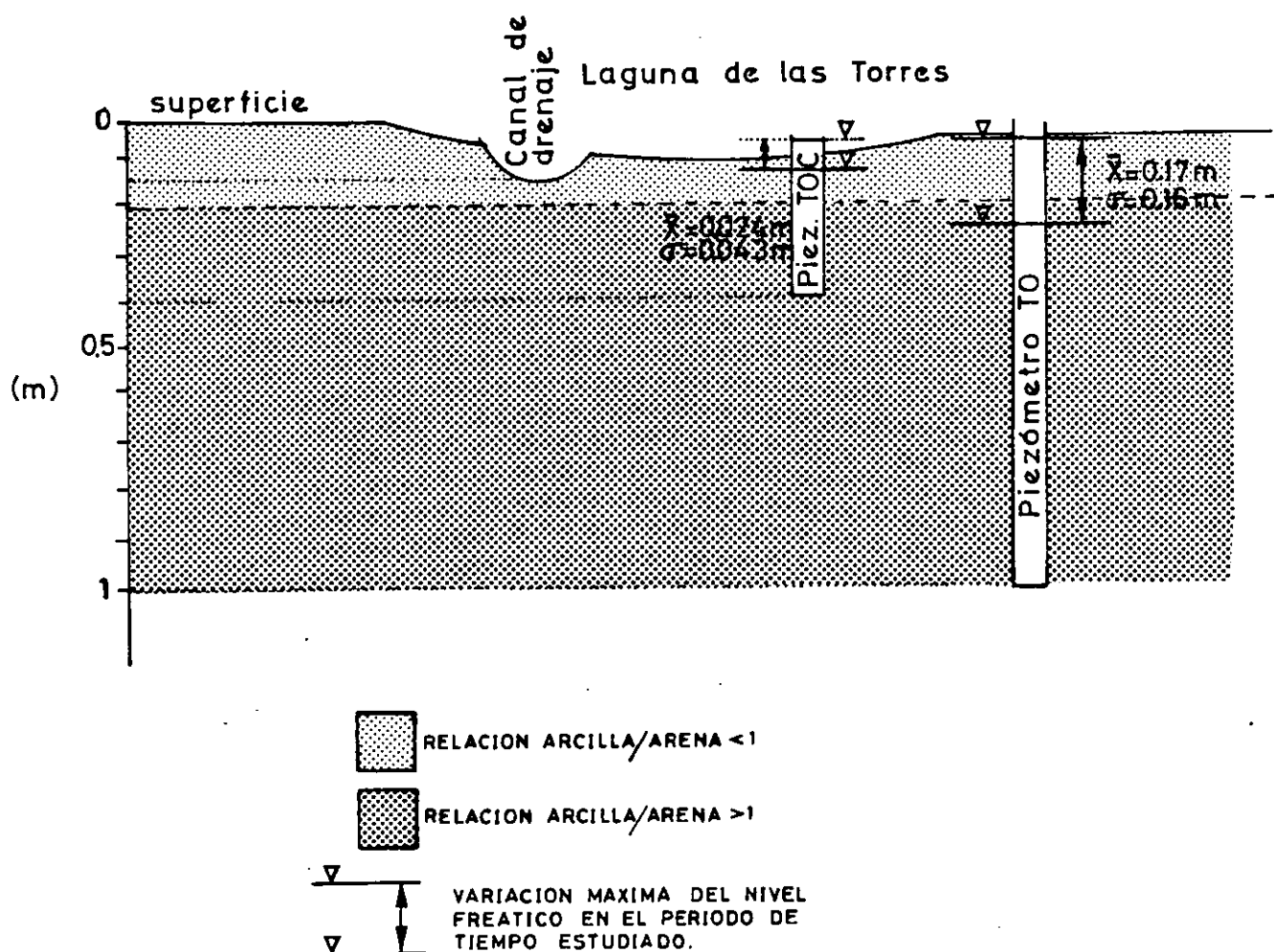


FIGURA 6.21. Perfil litológico esquemático en las proximidades de la laguna de las Torres.

**TABLA 6.11. Cálculo del coeficiente de infiltración para los periodos de muestreo en que se dispuso de datos del nivel freático en el piezometro T0 (Laguna de las Torres).**

MUESTREO (FECHA)	NUMERO DE DIAS	dh (m)	COEFIC. INFILTRACION K (m/día)
1 (31-I-88)	39	+0.38	$9.7 \cdot 10^{-3}$
2 (21-II-88)	21	-0.23	$1 \cdot 10^{-2}$
3 (18-III-88)	25	-0.05	$2 \cdot 10^{-3}$
4 (29-III-88)	11	-0.24	$2.1 \cdot 10^{-2}$
5 (18-IV-88)	20	-0.23	$1.1 \cdot 10^{-2}$
6 (4-V-88)	16	+0.01	$6.2 \cdot 10^{-3}$
7 (25-V-88)	21	-0.02	$9.5 \cdot 10^{-4}$
8 (15-VI-88)	21	+0.02	$9.5 \cdot 10^{-4}$
9 (3-VII-88)	18	+0.08	$4.4 \cdot 10^{-3}$
10 (19-VII-88)	16	-0.40	$2.5 \cdot 10^{-2}$
11 (2-VIII-88)	14	-0.13	$9.2 \cdot 10^{-3}$
12 (8-IX-88)	37	+0.03	$8.1 \cdot 10^{-4}$
13 (26-X-88)	49	+0.44	$8.9 \cdot 10^{-3}$
14 (25-XI-88)	30	+0.02	$6.6 \cdot 10^{-4}$
15 (23-XII-88)	28	0	0
16 (26-II-89)	65	+0.40	$6.1 \cdot 10^{-3}$
17 (12-III-89)	14	-0.49	$3.5 \cdot 10^{-2}$
18 (22-V-89)	41	-0.18	$4.3 \cdot 10^{-3}$
19 (7-V-89)	15	-0.06	$4 \cdot 10^{-3}$
20 (18-VII-89)	72	-0.17	$2.3 \cdot 10^{-3}$

A la vista de las características hidrológicas encontradas para la laguna de las Torres, cabe pensar en una situación hidrológica similar a la del ojo del Bravo, con una descarga subterránea directa de flujos largos del acuífero regional.

#### **6.7.2. Evolución geoquímica de agua superficial y subterránea.**

En el Apéndice 6.2 figuran los resultados de los análisis físico-químicos efectuados en la laguna de las Torres y su piezómetro próximo TO.

Las fluctuaciones registradas en la concentración iónica de la laguna (Figura 6.22) se deben claramente a procesos de concentración evaporativa y redisolución de sales precipitadas en forma de costra salina.

El origen de su elevada salinidad es fundamentalmente subterráneo (ver capítulo 5) y la precipitación atmosférica que cae directamente sobre la laguna evita que la cantidad de sales disueltas aumente progresivamente con el paso del tiempo. En efecto, el año 1988 algo más lluvioso que 1989, representó el mantenimiento de aguas algo más diluidas que las encontradas en el siguiente ciclo.

Por su parte, la conductividad en el agua subterránea, se mantuvo más o menos estable con pequeñas oscilaciones debidas a la recarga a través de la infiltración del agua de lluvia (Figura 6.22).

En ambos casos, el agua superficial y subterránea mantuvieron una composición iónica claramente clorurada sódica durante todo el tiempo que duró el estudio, lo que identifica una clara influencia del agua del acuífero sobre el humedal.

A pesar de que el pH de la laguna alcanza en algunos momentos valores de 9, el contenido en silicatos no parece verse afectado por esta circunstancia ya que en tales condiciones debería aumentar la solubilidad de los minerales silicatados y encontrarse por tanto mayores concentraciones en la disolución de las que se han medido. Sin embargo, se ha descrito para este acuífero, una disminución en el contenido de sílice en el agua subterránea para áreas de descarga (Rubio, 1984), lo que puede resultar otro síntoma de la alta relación entre agua superficial y subterránea para esta laguna.

Los valores del índice de saturación encontrados para los minerales silicatados calcedonia y cuarzo (Figura 6.23), indican una sobresaturación del agua subterránea en dichos minerales en casi todas las épocas del año, sin cambios demasiado significativos.

En el caso del agua superficial, el paso de agua sobresaturada a subsaturada y viceversa en minerales silicatados, se puede interpretar como consecuencia del proceso de concentración evaporativa y dilución de precipitaciones por el agua.

El poco volumen de agua que mantiene la laguna de las Torres, a causa de su drenaje artificial, puede ser la causa de que no lleguen a disolverse totalmente

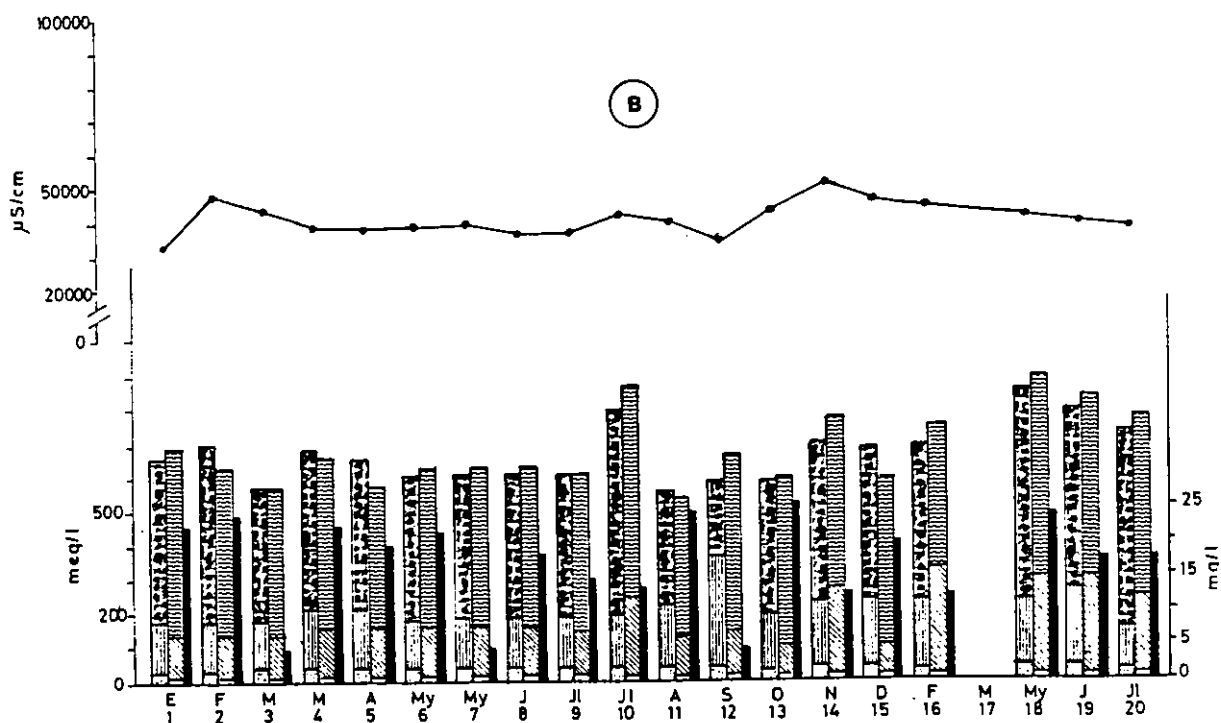
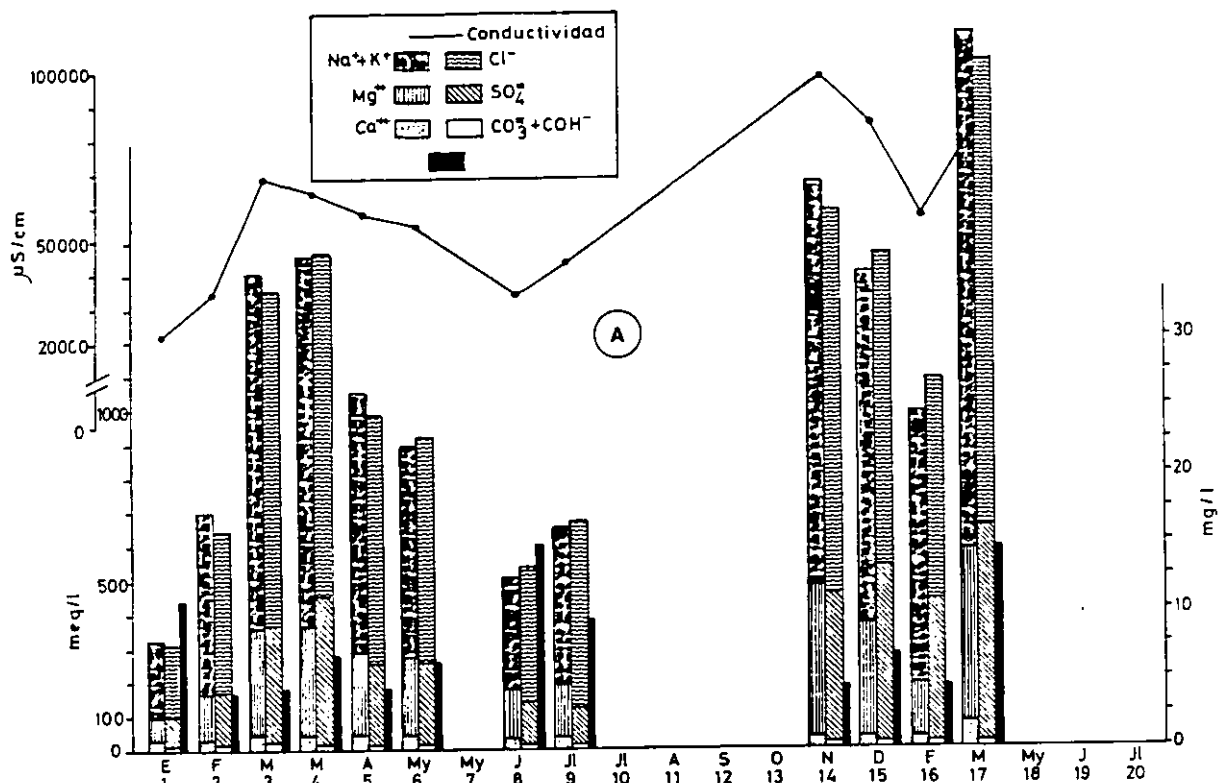


FIGURA 6.22. Variación de la concentración de iones mayoritarios (meq/l),  $\text{SiO}_2$  (mg/l) y conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ ) en (A) Laguna de las Torres (B) Piezómetro T0 durante el periodo muestreado.

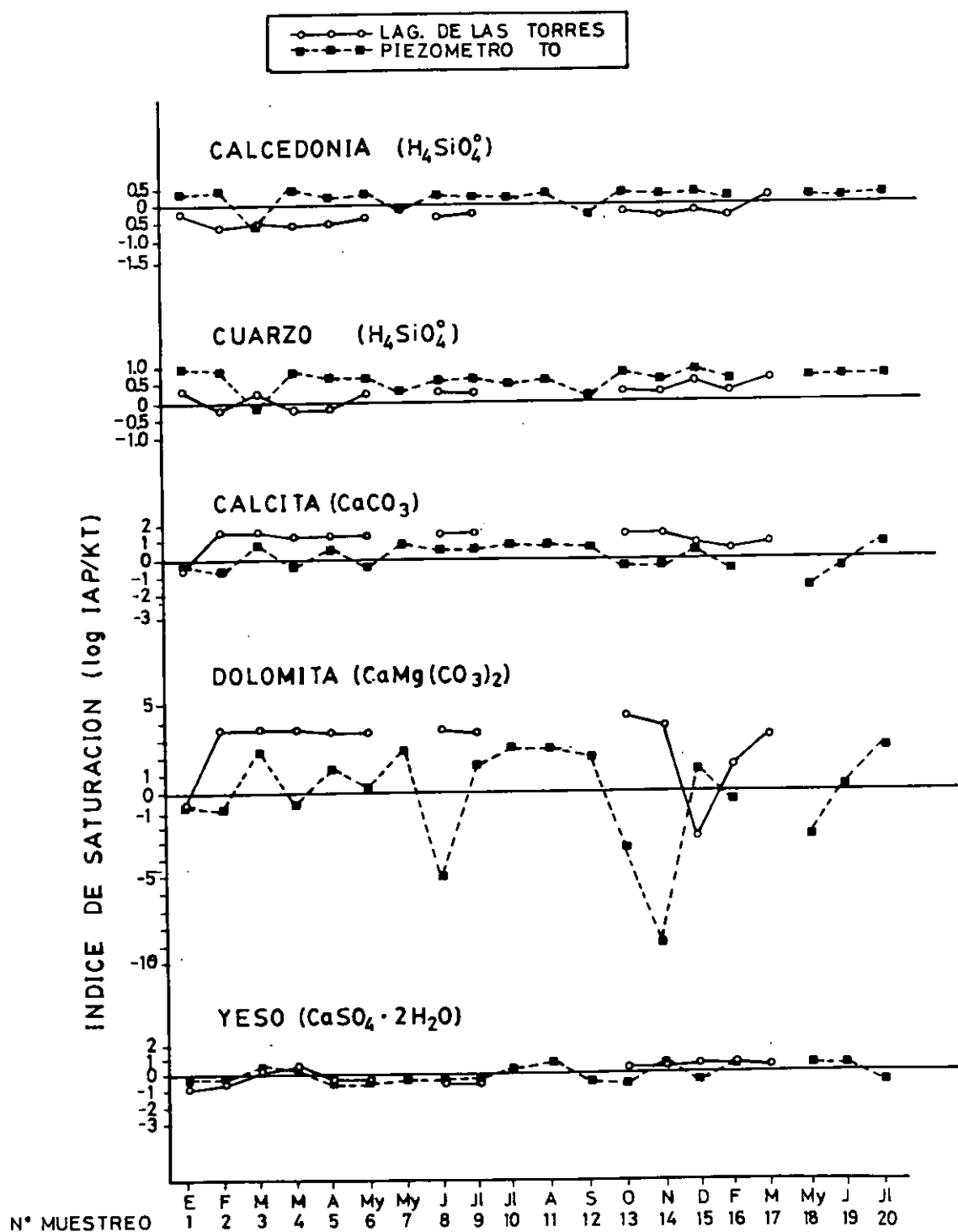


FIGURA 6.23. Indices de saturación de calcedonia, cuarzo, calcita, dolomita y yeso para el agua recogida en la laguna de las Torres y piezómetro TO de Enero de 1988 a Julio de 1989.



todas las sales que se encuentran en la cubeta, procedentes en cada ciclo hídrico de la descarga de agua subterránea mineralizada y de la disolución de la costra salina que queda en el fondo de la cubeta tras su secado anual. Por ello, el agua siempre aparece sobresaturada en calcita y dolomita (Figura 6.23) al ser estos los minerales que primero precipitan en las aguas naturales (Eugster & Hardie, 1978).

Exceptuando el primer muestreo, correspondiente a Enero de 1988, el resto de las observaciones mantienen más o menos constante el índice de saturación de estos dos minerales.

Si embargo, las oscilaciones en el piezómetro son mayores encontrándose valores del índice de saturación de calcita y dolomita tanto positivos como negativos.

El efecto de la recarga unido a la mínima evapotranspiración del agua subterránea a la atmósfera, hace a ésta más sensible a los procesos de evaporación y precipitación de sales.

La precipitación de yeso, en las aguas más o menos concentradas, suele considerarse una división crítica en la formación de tipos diferentes de salmueras (Hammer, 1986). Para la laguna de las Torres y piezómetro T0, la representación del índice de saturación del yeso en función del tiempo (Figura 6.23) pone de relieve la gran correlación existente entre los valores alcanzados por el agua superficial y la subterránea.

Concentraciones de sulfato suficientes como para que precipite yeso, en la laguna, sólo pueden ser

aportados por el agua subterránea altamente mineralizada, ya que el lavado de los terrenos en que se inscribe la laguna (arcosas) no se puede considerar como fuente del ión sulfato disuelto en el agua de escorrentía.

En este sentido, la ocurrencia simultánea de sobresaturación o subsaturación en yeso del agua de la laguna y del subsuelo, permite identificar una entrada casi permanente de agua subterránea en la cubeta.

Unicamente en el muestreo 15 (Diciembre-88) en la laguna está precipitando yeso, mientras que el agua subterránea se encuentra subsaturada para dicho mineral. La coincidencia en el tiempo de este proceso con la bajada drástica del índice de saturación de la dolomita y la bajada del pH, explica que el  $\text{Ca}^{++}$  presente en el agua precipite unido al ión  $\text{SO}_4^{--}$ .

Mientras que en la laguna, la precipitación de yeso va acompañada en todos los casos de una precipitación de calcita y dolomita, en el agua subterránea es frecuente que sólo precipite yeso, debido probablemente al efecto de ión común o a un aumento del  $\text{CO}_2$  disuelto en el agua.

#### ***6.8. FUNCIONAMIENTO GLOBAL DE FORMACIONES PALUSTRES EPIGENICAS E HIPOGENICAS: MODELOS CONCEPTUALES.***

Al comparar los aspectos hidrológicos y químicos de las lagunas escogidas como representantes de cuatro

tipos genético-funcionales de humedales, se reconocen procesos de tipo general común a todos los humedales y otros más particulares que individualizan dichos tipos.

Esta idea, ya fue apuntada por Winchester (1987) para características hidrológicas y por Arakel et al. (1990) para aspectos geoquímicos.

Entre los procesos generales que ocurren de forma similar para todas las lagunas, se encuentran los que controlan mayoritariamente la salinidad del agua, esto es, concentración evaporativa y redisolución de sales en el caso de que existan costras salinas. En ambos casos la influencia de las condiciones climáticas, fundamentalmente precipitación y evaporación es decisiva.

Las características particulares que provocan en último término la distinción entre formaciones palustres epigénicas e hipogénicas se refieren al aporte de agua subterránea.

Si el agua que entra en el humedal es subsuperficial y esporádica conferirá unas características químicas e hidrológicas peculiares frente a aquellos otros humedales que reciben una descarga de agua subterránea profunda y más constante en el tiempo.

La aproximación a los dos tipos de funcionamiento aparecen reflejados en los modelos conceptuales contruidos para tal efecto.

En la Figura 6.24 se ha tratado de esquematizar el funcionamiento de una laguna epigénica temporal típica

a lo largo de un ciclo hidrológico completo.

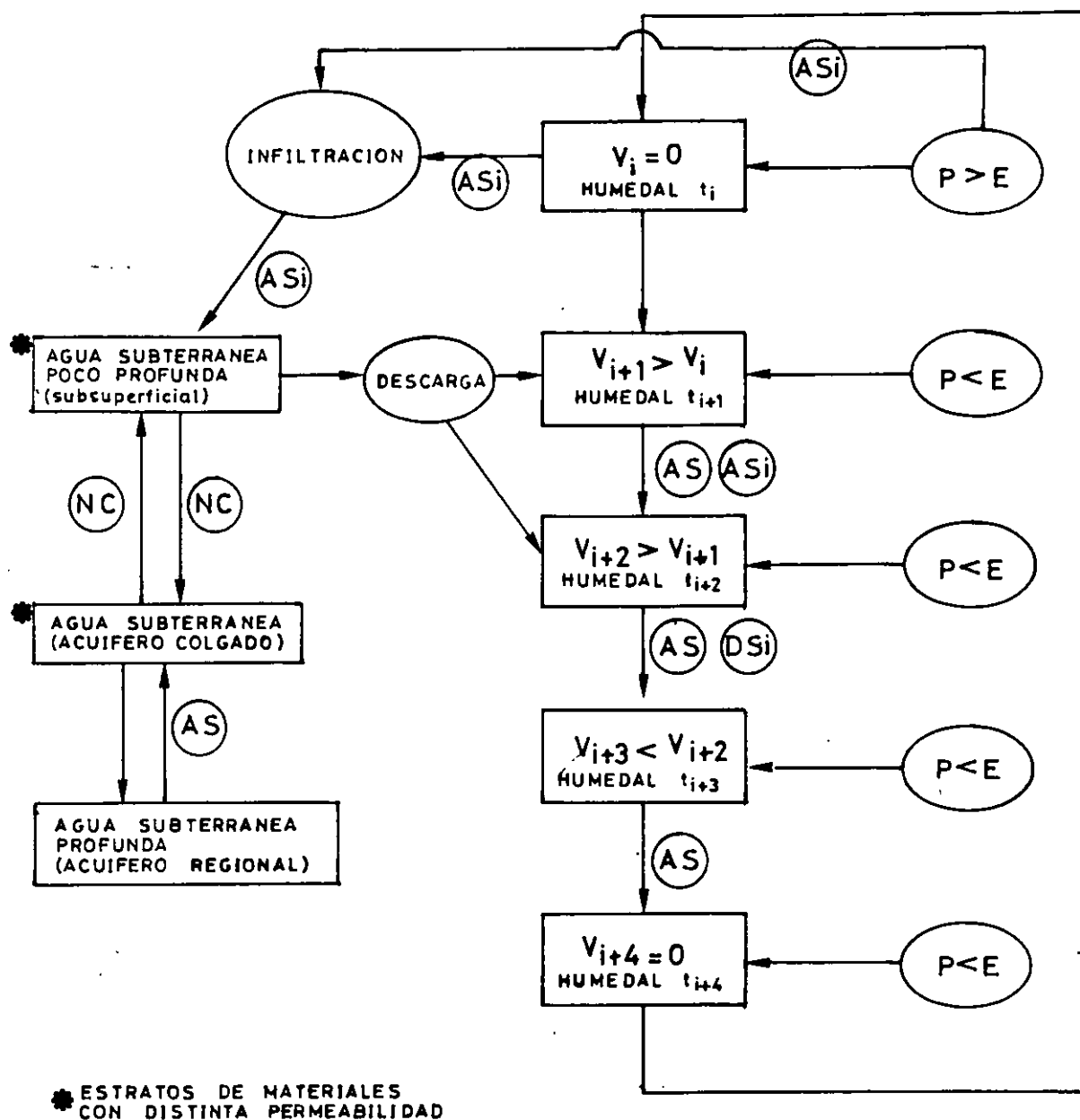
Para ello, se ha partido de un estado inicial ( $t_1$ ) que podría situarse a finales del periodo estival, cuando la laguna se encuentra seca ( $V_1=0$ ).

Al comenzar las primeras lluvias otoñales, y superar éstas a la evaporación se produce una nueva situación para el humedal, que en el modelo hemos identificado como  $t_{1+1}$ .

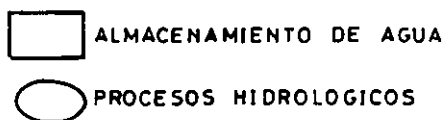
En esta nueva fase, el agua de lluvia que en un primer momento se infiltra en el terreno seco, comenzará a rellenar la cubeta ( $V_{1+1} > V_1$ ). Siempre que las condiciones litológicas sean favorables (por ejemplo existencia de estratos con distintas permeabilidades, frecuentes en terrenos sedimentarios) el agua infiltrada puede quedar retenida por espacios cortos de tiempo en niveles próximos a la superficie (agua subsuperficial) o algo más profundos (acuíferos colgados). Puede ocurrir que estos acuíferos, también estén alimentados de agua subterránea más profunda si el área corresponde a descargas de un acuífero regional.

Si estos procesos de infiltración se producen en terrenos arcósicos, el agua de lluvia al atravesar pequeñas franjas de terreno no saturadas puede sufrir hidrólisis de  $\text{SiO}_2$  con el consiguiente aumento de la concentración de este elemento disuelto en el agua (ASi) (Rubio, 1984).

Esta etapa puede prolongarse durante todo el invierno o por lo menos mientras que la precipitación exceda a la evaporación, ya que en el momento en el que



#### COMPONENTES HIDROLOGICOS



P PRECIPITACION  
 E EVAPORACION  
 V VOLUMEN DE AGUA EN EL HUMEDAL

#### PROCESOS QUIMICOS

(NC) NO CAMBIOS  
 (AS) AUMENTA LA SALINIDAD  
 (DS) DISMINUYE LA SALINIDAD  
 (ASi) AUMENTA LA CONCENTRACION DE  $\text{SiO}_2$  DISUELTO  
 (DSi) DISMINUYE LA CONCENTRACION DE  $\text{SiO}_2$  DISUELTO

FIGURA 6.24. Modelo conceptual de funcionamiento de un humedal de tipo epigénico. (Para explicaciones ver texto).

se invierte esta relación, se pasa a la fase  $t_{1+2}$ .

La descarga del agua subsuperficial acumulada que puede producirse en esta etapa o en la anterior, provocará un ligero aumento en el contenido de agua de la laguna, aunque la evaporación comience a ser importante ( $V_{1+2} > V_{1+1}$ ), además de un incremento en la concentración de  $\text{SiO}_2$  y en la salinidad total, procedente del aporte subsuperficial.

Cuando esta reserva de agua subterránea poco profunda se agota a causa de la evapotranspiración y/o la descarga en superficie, el humedal comienza a sufrir un descenso brusco de sus niveles de agua (situación  $t_{1+3}$ ) como consecuencia de la alta tasa de evaporación a que se ve sometido, culminando en su desecación total en la fase  $t_{1+4}$  con lo que se cierra el ciclo hidrológico.

A medida que el humedal va perdiendo agua en las últimas etapas de su ciclo, se produce un ligero aumento de la salinidad al aumentar la concentración de los iones disueltos.

En la Figura 6.25 se refleja el modelo hipotético de funcionamiento de una laguna hipogénica temporal típica, para lo que se ha partido, al igual que en el modelo anterior, de una situación inicial ( $t_1$ ) con el humedal seco ( $V_1=0$ ).

Las primeras lluvias otoñales, producen un efecto similar a lo ocurrido en el tipo de humedal epigénico: un primer momento de infiltración hasta que el terreno comienza a saturarse de agua y los niveles de la laguna aumentan ( $V_{1+1} > V_1$ ).

Gracias al ascenso del nivel freático regional en esta época del año, las descargas del mismo en superficie favorecen el mantenimiento de los niveles de agua superficial no sólo en el periodo invernal ( $t_{1+1}$ ) sino incluso hasta comienzos de la época seca ( $t_{1+2}$  y  $t_{1+3}$ ).

Si el agua subterránea que descarga en el humedal tiene un contenido salino importante provocará el aumento progresivo de la concentración iónica de las aguas del humedal.

Por otro lado, si este agua subterránea posee una elevada concentración de  $\text{Na}^+$  disuelto, como ocurre en áreas de descarga regional del acuífero de Madrid, se pueden ver favorecidos procesos geoquímicos tales como el cambio de bases, ya comentado por Bosch et al. (1990), mediante el cual se alternan en el tiempo la composición catiónica de sódica a cálcica y viceversa.

Cuando el balance evaporación-precipitación se hace positivo a favor de la primera, descienden no sólo el nivel de agua del humedal sino también el nivel freático regional ( $t_{1+4}$ ) cuya descarga no supera la tasa de evaporación creciente. La continuación de esta situación, ya en el periodo estival ( $t_{1+5}$ ), provoca el total secado de la cubeta, que permanecerá en estas condiciones hasta la siguiente época de lluvias.





## **6.9. DISCUSION.**

La utilización de balances hídricos para conseguir una aproximación coherente al modo de funcionar de distintos humedales se revela como una herramienta de gran utilidad, complementada sin lugar a dudas con el examen de la evolución hidroquímica de los mismos.

Ambas características, son mencionadas con frecuencia en la literatura como fundamentales para conocer la estructura y función de los humedales (Dooge, 1975; Gooselink & Turner, 1978; Greeson et al, 1979; Daniel, 1981; Van der Valk, 1981; Adamus & Stockwell, 1983; Sather & Smith, 1984; Carter, 1986; Custodio, 1987; Crowe, 1989) aunque a pesar de su reconocida importancia, es frecuente que no se investiguen a fondo (Greeson et al., 1979; Llamas, 1982; LaBaugh, 1986), con lo que muchos balances químicos (de nutrientes o iónicos) son sólo primeras aproximaciones, pues faltan balances hídricos detallados (Custodio, 1987). En efecto, la consecuencia de no medir todos los componentes de los balances hídricos o medirlos con metodologías inadecuadas, da como resultado balances químicos erróneos, aunque las técnicas analíticas utilizadas sean buenas. En estos casos, se debe tener especial cuidado con las interpretaciones químicas (LaBaug & Winter, 1984), ya que la concentración y composición iónica de un humedal, está reflejando la calidad de las entradas de agua y la interacción de ésta con el suelo y la vegetación (Carter, 1986; Verhoeven, 1986; Boelter & Verry, 1977).

En muchas ocasiones es difícil identificar en el

campo o con estudios de tipo extensivo, las descargas de agua subterránea de los simples encharcamientos de agua de lluvia, sino es mediante la observación de fenómenos asociados o a través de aspectos hídricos y químicos de sus aguas (Toth, 1966). Por tanto, el transporte de agua y elementos químicos desde y hacia el humedal resulta básico para entender el ecosistema (Winter & Woo, 1988).

En efecto, una lluvia corta que no produce una elevación importante en la superficie freática, puede ser responsable de una subida en el nivel de las aguas del humedal durante un periodo corto de tiempo, mientras que un periodo de lluvias más prolongado, puede provocar un mantenimiento de agua en el humedal con mucho retraso con respecto a la época húmeda (Kurimo, 1984; Linares & del Valle, 1986). En ambos casos, sólo se conocerá con exactitud la procedencia del agua del humedal con observaciones periódicas del mismo sistema.

Sin embargo, si se conoce bien el funcionamiento de los sistemas hidrogeológicos donde se ubican los humedales, no resulta nada despreciable la realización de tipologías que tengan presente aspectos superficiales y subterráneos del sistema como las realizadas en el acuífero de Madrid por Sastre (1978), Rubio (1984) y Herrera (1987).

A pesar de las deficiencias metodológicas de los balances hídricos, que ya han sido comentadas, y de las que derivan la imposibilidad de utilizar sus resultados de entradas y salidas de agua como valores básicos para la realización de balances de masas, queda claro, que la comparación de unos balances con otros (cuando, como

en nuestro caso el porcentaje de error es muy similar en todos ellos) ofrece la posibilidad de identificar las entradas y salidas mayoritarias de agua en cada tipo de humedal, primordial para elaborar una clasificación definitiva.

Como ya se ha comentado, desde el punto de vista metodológico, los dos componentes del balance hídrico más conflictivos de determinar, resultan ser la evaporación y el aporte de agua subterránea desde o hacia el humedal.

Con respecto a la evaporación, la búsqueda de relaciones entre varios métodos de medida, viene siendo casi obligado en los trabajos más recientes que tratan de forma más o menos extensa aspectos hidrológicos.

En el caso de los tres métodos de cálculo y medida de la evaporación y evapotranspiración más extendidos: evaporímetro A, método semiempírico de Penman y método de Thornthwaite, suele ser éste último el más utilizado por su facilidad de obtención, a pesar de resultar muy inexacto (Moya et al., 1986).

En nuestro caso, las comparaciones realizadas para la estación de Cuatro Vientos, muestran como el evaporímetro Piché y el método de Thornthwaite sobrevalora las medidas del evaporímetro A, mientras que el método de Penman las infravalora. Relaciones bien diferentes se obtienen en otras regiones (Moya, et al., 1986; Kadlec et al., 1988) por lo que puede pensarse en una importancia decisiva de las condiciones climáticas locales que no permite la extrapolación de relaciones entre medidas de evaporación de unas regiones a otras.

Siempre que sea posible, la instalación de buenos aparatos de medida junto a los humedales parece la solución más adecuada.

Otro problema asociado a la medida de evaporación en humedales viene dado por la presencia de vegetación en la cubeta. En la actualidad, existe un gran desacuerdo acerca de si este elemento influye de forma decisiva en la pérdida de agua (Prihan & Ondok, 1980; Mitsch & Gosselink, 1986).

Autores como Penman (1956), Eisenlohr (1966), Linacre et al (1970) o Linacre (1976) afirman que la vegetación en un humedal reduce la evaporación en comparación con una lámina de agua totalmente libre, mientras que otra corriente de investigadores defienden lo contrario (Rychnovska et al., 1972).

En nuestro caso, la existencia de un alto porcentaje de vegetación helófitas en la cubeta de algunos humedales, provoca posiblemente una transpiración adicional a la evaporación calculada como si de láminas de agua libre se tratara. Como consecuencia para algunos de estos humedales, cabe pensar que la entrada de agua subterránea es mayor que la que figura en los balances hídricos calculados, idea indicada por otra parte por Winter (1981b) quien afirma que la estimación del agua subterránea como término residual puede estar seriamente infravalorada.

Este efecto se manifiesta sobre todo en las lagunas que hemos denominado hipogénicas. Si tenemos en cuenta que los humedales dominados por agua atmosférica suelen ser químicamente diluidos mientras que los dominados

por agua subterránea tienen características similares a esta entrada (Winter & Woo, 1988), cabe pensar que en el ojo del Bravo y la laguna de las Torres la descarga de agua subterránea se produce prácticamente durante todo el ciclo hidrológico con una cuantía variable, fenómeno que se detecta parcialmente a través de los balances hídricos calculados ya que es evidente que las variaciones en las características hidrológicas de un humedal, tienen un profundo efecto en la química del agua (Winter & Carr, 1980)

La comparación hidroquímica de agua superficial y subterránea también resulta muy interesante en los humedales epigénicos del acuífero de Madrid para entender el balance hídrico en un contexto global. Tanto para la laguna Chica como para la laguna Delgada, el aumento esporádico en el contenido de  $\text{SiO}_2$  disuelto, coindiendo con los momentos de entrada de agua subsuperficial, permite interpretar que es este aporte la fuente principal de  $\text{SiO}_2$  en el agua superficial, aunque no hay que olvidar tampoco que variaciones en las poblaciones de diatomeas pueden estar afectando de forma importante a las oscilaciones de la concentración de dicho elemento (Hammer, 1986; Wood & Talling, 1988).

La clasificación de humedales realizada por Novitzki (1979) en función de características hidrológicas ya puso de relieve los modos de funcionamiento diferentes de humedales "superficiales" y "subterráneos".

A pesar de que las nomenclaturas utilizadas para este tipo de trabajos pueden resultar confusas, por lo tajante de la división superficial-subterráneo (o en nuestro caso epigénico-hipogénico), es claro que lo que

intentan reflejar es el distintos grado de interacción con el agua subterránea.

Es frecuente que un mismo humedal puede variar su relación con el agua subterránea a lo largo de un año (Hollands, 1987; Siegel & Glaser, 1987) o interanualmente (Anderson & Munter, 1981) alternando la recarga del acuífero con la descarga del mismo. Incluso pueden existir humedales "flow-through" que descargan agua subterránea desde un sector y recargan por otro simultaneamente (Winter & Carr, 1980; Lodge et al., 1989). Es claro pues, que a menudo no pueden usarse valores medios del nivel freático para determinar las direcciones de flujo subterráneo en las inmediaciones del humedal, ya que éstas pueden variar temporalmente en los márgenes del mismo (Anderson & Munter, 1981; Winter, 1983).

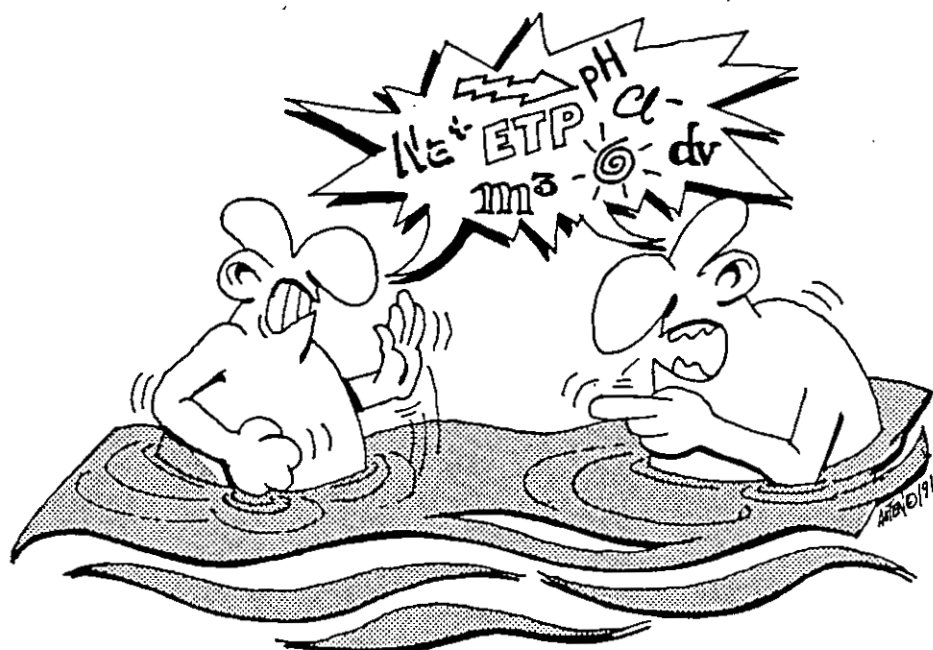
En general, los tipos de formaciones palustres superficiales o epigénicas aparecen más correlacionadas con las variaciones de agua atmosférica y esorrentía superficial, aunque se presentan de forma variable en el espacio y en el tiempo entradas de agua generalmente subsuperficial que estabiliza los cambios bruscos de volumen del humedal.

De igual forma, las formaciones palustres subterráneas o hipogénicas se encuentran muy influidas por las variaciones del nivel freático, aunque el aporte superficial puede ser importante en determinados periodos.

Aunque las investigaciones realizadas hasta el momento sugieren que existen muchos más humedales de descarga que de recarga (Carter & Novitzki, 1988),

resulta tambien muy habitual la aparición de humedales que funcionan alternativamente como recarga o descarga de un acuífero subyacente (Carter, 1986; Custodio, 1987).

En cualquier caso, el agua situada por debajo de la superficie de la tierra (el término de agua subterránea se utiliza unicamente referido a agua que circula por los acuíferos (Custodio & Llamas, 1983)) ya sea profunda o subsuperficial, juega un importante papel en el funcionamiento de cualquier humedal por su efecto amortiguador de las variaciones de los niveles de agua.



## 7. DISCUSION GENERAL



En general, los humedales de regiones áridas y semiáridas al estar sometidos a un régimen fluctuante poseen una biota peculiar con adaptaciones específicas, y como afirma Williams (1985), es precisamente en la naturaleza de estos procesos adaptativos donde se centra el gran interés limnológico de estos sistemas.

Aunque es común hablar de adaptaciones de especies animales y vegetales específicas para cada uno de los factores provocadores de perturbación, lo cierto es, que la biota en estos medios está sometida a una combinación de presiones ambientales, y sus adaptaciones deben entenderse como fenómenos multidireccionales (Williams, 1985; Brock, 1986) que posibilitan la supervivencia y reproducción en un amplio rango de condiciones.

En efecto, dado que las perturbaciones ocurren con una intensidad y una frecuencia impredecibles (Williams, 1985; Resh et ál., 1988) son la causa de la gran heterogeneidad espacio-temporal (Sousa, 1984) que se manifiesta en las distintas formas de compromiso con el medio adoptadas por las especies que explotan estos medios.

Entre las perturbaciones que soportan los humedales en zonas esteparias, se suelen describir a la salinidad y la sequía como los factores con mayor incidencia en la desestabilización del sistema (Brock, 1986), aunque como comenta Sousa (1984), dado que las especies han desarrollado adaptaciones específicas para completar sus ciclos de vida en condiciones fluctuantes de salinidad e inundación, dependen de estas perturbaciones para dar continuidad a la población, por lo que sería más acertado hablar de perturbación cuando

se interrumpen estos cambios en las condiciones ambientales.

Esta idea introduce una interesante discusión que se puede centrar con preguntas como ¿en un sistema acuático temporal, la perturbación es la sequía o la inundación permanente? ¿en un humedal de aguas salinas la perturbación la constituye dicha salinidad o el endulzamiento del agua?.

Independientemente de la respuesta, lo cierto es, que estos medios están sometidos a un régimen de fluctuación importante impuesto sobre todo por las entradas y salidas de agua al sistema (Margalef, 1987) y aunque factores como la profundidad de las cubetas inciden directamente en el grado de permanencia del agua (Alonso & Comelles, 1987) es el régimen hidrológico el que adquiere una importancia decisiva en su organización y funcionamiento.

A la vista de los resultados obtenidos en este trabajo, se pone de relieve como el agua existente por debajo de la superficie del terreno, ya sea subsuperficial o subterránea, adquiere un papel fundamental en los estados de inundación de los humedales epigenicos e hipogenicos, ya que en ambos casos, ejerce un efecto amortiguador de las fluctuaciones experimentadas por el nivel del agua superficial.

Este efecto amortiguador o tampón a cambios bruscos, impuestos sobre todo por las condiciones meteorológicas se hace más patente en las lagunas de tipo epigénico, más sometidas a este tipo de condiciones modificadoras. En este tipo de sistemas, el

agua subsuperficial que entra esporádicamente en la cubeta puede llegar a prolongar los niveles de agua en períodos en que la evaporación supera a la precipitación. Este aporte de agua subsuperficial se comporta a modo de reserva hídrica del humedal al ser afectada con cierto retraso por la evaporación creciente de la época estival, mientras que la laguna acusa más rápidamente dicha pérdida.

La existencia de humedales epigénicos no requiere necesariamente de la presencia de dichas reservas subterráneas, aunque la naturaleza de sus fluctuaciones sí depende de estos mecanismos. En otras palabras, sin agua subsuperficial asociada aparecen humedales en el paisaje con características ecológicas diferentes a los influidos por estos fenómenos.

En realidad, aunque dichas entradas de agua subsuperficial no puedan considerarse descargas de agua subterránea en sentido estricto, hay que reconocer su importancia en la naturaleza de los procesos ecológicos que se desarrollan en estos humedales.

Por otro lado, pequeñas variaciones en la composición química de la laguna como ocurre en los humedales estudiados, donde las concentraciones de silicatos se ven alteradas por la entrada de este agua del subsuelo puede tener importantes consecuencias para determinados grupos de organismos como puede ser el caso de poblaciones de diatomeas (Wood & Talling, 1988).

Las lagunas consideradas hipogénicas en este trabajo a pesar de ser temporales, se han revelado más estables que las epigénicas en cuanto a sus niveles

hídricos se refiere y su relación con las aguas subterráneas ha quedado bastante bien establecida aunque tampoco se puede descartar en este tipo de humedales, el concurso del agua subsuperficial y superficial como entradas y salidas de agua de cierta trascendencia.

En este tipo de humedales, además confluye otra circunstancia: al permanecer sus fluctuaciones hídricas tan íntimamente unidas al agua subterránea, cuando se trata de la interrelación con flujos de largo recorrido, las características químicas del agua subterránea pueden afectar de tal forma al humedal que originen una laguna hidroquímicamente anormal en el contexto regional.

La presencia de lagunas salinas encontradas sobre terrenos arcósicos del acuífero de Madrid, sería el caso extremo de un espectro amplio de situaciones, en las que no siempre la manifestación del agua subterránea en superficie se traduce en un humedal con aguas mineralizadas.

De todo lo dicho hasta aquí, se derivan importantes consideraciones que deben ser tenidas en cuenta en la gestión de humedales.

Después de los tiempos en que los humedales españoles fueron desecados masivamente, al ser considerados áreas insalubres, asistimos en los últimos años a un cambio aparente de mentalidad.

Muchos son los trabajos en los que se incide sobre los valores de los humedales. En este sentido, Montes & Bifani (1990) hacen una revisión de dichos aspectos

referidos a la personalidad ecológica de los humedales españoles y su necesidad de conservación y gestión adecuada. Sin embargo, a la hora de proponer medidas concretas de protección, se sigue atendiendo con mayor énfasis a los elementos más conspicuos en detrimento de aquellos otros menos destacados en el paisaje.

En efecto, siguen siendo los impactos más visibles, tales como vertidos de residuos sólidos o líquidos, drenajes o canalizaciones los que provocan denuncias y medidas de actuación urgentes, mientras que las alteraciones de los procesos que ellos se desarrollan, fundamentalmente hidrológicos, y que conforman la base misma de la existencia de estos sistemas, suelen quedar relegados a segundo plano, cuando no olvidados.

En ocasiones podría justificarse este sesgo por el desconocimiento de dichos procesos y mecanismos de funcionamiento, aunque también es cierto que en muchas ocasiones se desoyen las opiniones aportadas por la comunidad científica, que empieza a ver la trascendencia de las implicaciones de algunos factores que tradicionalmente no se han tenido en cuenta.

En este sentido, el papel que juegan los fenómenos hidrológicos en los estados naturales de inundación de los humedales y especialmente las aguas subterráneas son olvidados con frecuencia y como resalta Llamas (1989) existen pocos casos documentados donde se especifique con claridad los impactos negativos que ha producido la sobreexplotación de aguas subterráneas en los humedales, aludiendo siempre a otras causas como las responsables de su destrucción.

Al abordar en el presente trabajo una clasificación

de humedales desde una perspectiva genético-funcional, se ha pretendido enfatizar cómo el conocimiento de los mecanismos causales que conducen a equilibrios múltiples del sistema, son puntos clave para la elaboración de planes de gestión adecuados.

Recientemente, Novitzki (1989), al proponer una clasificación de humedales basada en aspectos hidrológicos, pone de relieve la importancia de conocer las vías de entrada y salida de agua a cada sistema de forma que se puedan tomar las medidas adecuadas a su modo de funcionar.

Sin embargo, al diferenciar dos tipos básicos de humedales, aquellos cuya inundación depende fundamentalmente de factores superficiales y aquellos otros más íntimamente unidos al agua subterránea, pone de manifiesto que los primeros son más sencillos de gestionar, debido a que las alteraciones a que pueden verse sometidos, son más fáciles de conocer, medir y por tanto prevenir.

En este sentido, al enumerar las posibles causas de degradación que pueden afectar a uno y otro tipo de humedal, acentúa ciertas diferencias que pueden resultar demasiado simples a la vista de los resultados obtenidos en este trabajo.

En efecto, las medidas de protección encaminadas a conservar humedales epigénicos e hipogénicos no deberían ser muy diferentes ya que en ambos casos el mantenimiento de su fluctuación debe estar en la base misma de su conservación (Margalef, 1987).

Las alteraciones del régimen hídrico, aunque pueden

afectar con mayor o menor intensidad al mantenimiento de los dos tipos de humedales, provocarán en último término la desaparición de procesos ecológicos peculiares.

Ante la sobreexplotación de agua subterránea, los humedales más drásticamente dañados son sin duda los que aquí hemos denominado hipogénicos, ya que sus poblaciones de organismos se mantienen habitualmente en medios amortiguados con fluctuaciones y cambios poco bruscos.

Sin embargo, la desecación de los humedales epigénicos a causa de este tipo de impacto sólo es cuestión de tiempo.

Tal y como se ha podido comprobar en humedales del acuífero de Madrid el nivel freático regional puede descargar o mantener acuíferos colgados más próximos a la superficie. Una bajada de estos niveles afecta al nivel acuífero superior y en último término a las lagunas epigénicas situadas sobre este tipo de terrenos.

A pesar de que sus poblaciones se encuentran más adaptadas a la sequía que las encontradas en lagunas hipogénicas no cabe duda de que un efecto prolongado terminaría por hacer desaparecer el humedal.

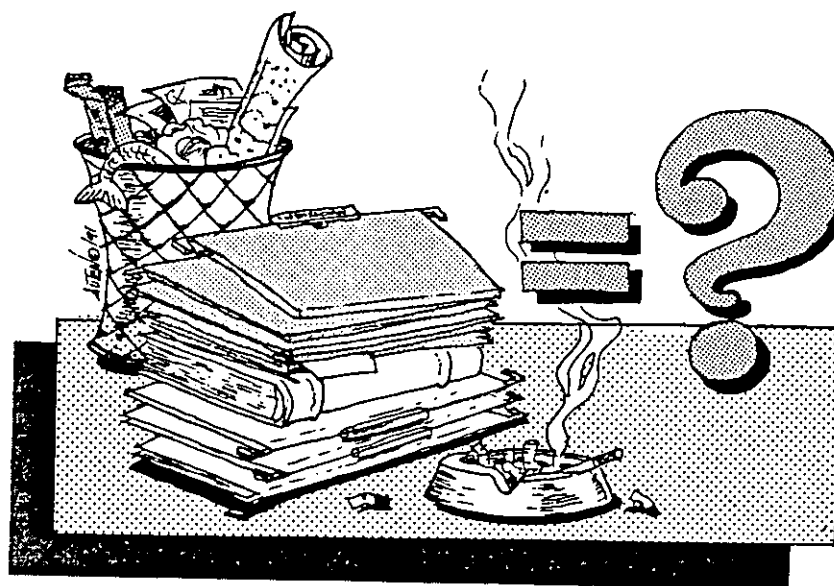
Asimismo, una inundación permanente de ambos tipos de humedales tendría un efecto más negativo sobre sistemas epigénicos aunque ambos se verían afectados.

En cualquier caso, uno y otro tipo de actuaciones pueden provocar efectos que en muchas ocasiones pueden

resultar irreversibles.

A este respecto, el puente tendido con este trabajo entre la hidrología y la limnología abre un campo de investigación prácticamente inexplorado en el que resulta esencial ampliar los conocimientos teóricos que sobre las relaciones entre procesos ecológicos e hidrológicos se posee, sobre todo por su trascendencia en el campo de la conservación y gestión de estos sistemas gravemente amenazados.





## 8. CONCLUSIONES

Como resultado de lo anteriormente expuesto se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1.- De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de variables superficiales y subterráneas del medio físico, las principales variaciones del área del acuífero de Madrid se deben a tres tendencias fundamentales que establecen un gradiente ambiental en el territorio.

Estas se concretan en:

- Exceso hídrico entendido como balance entre precipitación y evaporación.
- Profundidad del nivel freático y características hidroquímicas del agua subterránea.
- Frecuencia y densidad de la red de drenaje.

2.- Atendiendo a dichas tendencias, se pueden diferenciar dos tipos fundamentales de áreas con distinta vocación palustre: aquellas más deficientemente drenadas donde se producen descargas de flujo de agua subterránea y un superávit importante constituyendo por tanto, áreas con una gran posibilidad de mantener humedales, frente a aquellas otras con una red de drenaje más potente, recarga del acuífero y mayor periodo de sequía, donde resultará más improbable encontrar este tipo de sistemas.

3.- La sectorización ambiental de este gradiente, permite concretar cinco áreas homogéneas con respecto a las características limnológicas de los humedales que mantengan:

- Descarga regional.
- Descarga intermedia.
- Descarga local.

- Recarga sobre terrenos arenosos.
  - Recarga sobre terrenos de raña.
- 4.- El catálogo de formaciones palustres realizado, pone de manifiesto que de las 53 lagunas y charcas inventariadas, 36 han desaparecido por diversos factores de tensión entre los que cabe destacarse, la utilización de sus cubetas como receptáculos de residuos sólidos y líquidos.
- 5.- Del análisis de la densidad palustre para cada sector ambiental, se observa que para aquellos influidos por la descarga de agua subterránea, el número de formaciones palustres por unidad de área es mayor.
- 6.- La gran variabilidad de formaciones palustres encontradas en el acuífero de Madrid, viene impuesta por los distintos grados de relación de éstas con las aguas subterráneas, siendo la morfometría de las cubetas, el grado de mineralización y turbiedad de sus aguas y la permanencia del agua los factores más característicos de esta variabilidad.
- 7.- Se confirma que las lagunas pertenecientes a sectores de descarga de agua subterránea poseen un periodo de inundación más prolongado que las situadas en áreas de recarga.
- 8.- Del análisis de los parámetros morfométricos de las cubetas y cuencas de recepción, se desprende la existencia de tres patrones, que al relacionarse con el tipo de sector ambiental en el que se ubican, adquieren significado genético:

- Formas redondeadas y profundas sin playa tipo "ojos" en sectores de descarga local e intermedia de agua subterránea.
- Formas irregulares y someras con playa en sectores de descarga regional de agua subterránea.
- Formas redondas y someras con playa en sectores de recarga de agua subterránea.

9.- Asimismo, las tendencias hidroquímicas espaciales que se obtienen del examen de la concentración y composición iónicas reflejan la estrecha relación entre agua superficial y subterránea en humedales de descarga.

Estas se concretan en:

- Lagunas hiposalinas clorurado sódicas en sectores ambientales de descarga regional del acuífero.
- Lagunas subsalinas bicarbonatado sódicas en áreas de descarga de flujos intermedios.
- Lagunas dulces bicarbonatado cálcicas en sectores de recarga y descarga local.

10.- El fenómeno de evolución geoquímica que sufre el agua subterránea en el acuífero de Madrid en flujos de medio y largo recorrido queda claramente reflejado en lagunas de descarga. Esta influencia se detecta en las formaciones palustres estudiadas mediante los índices iónicos  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Cl}^-/\text{Alcalinidad}$ .

11.- En terrenos arcósicos adquiere especial importancia la concentración de  $\text{SiO}_2$  de las aguas superficiales ya que se revela como un elemento interesante a la hora de distinguir aquellos humedales influídos mayoritariamente por agua de lluvia de aquellos otros, donde los flujos locales de agua subterránea

descargan en las lagunas despues de haber producido procesos de hidrólisis de silicatos al atravesar la zona no saturada del subsuelo.

12.-Para un mismo territorio y de forma natural, el estado trófico y la turbiedad de las aguas de los humedales están relacionados directamente con el grado de interacción con el agua subterránea, resultando las lagunas de recarga más eutróficas y turbias que las de descarga.

13.-Entre los taxones de crustáceos identificados en las formaciones palustres del área del acuífero de Madrid, se han detectado al menos tres formas de compromiso de los organismos con el medio, que reflejan la heterogeneidad de ambientes creada por el distinto grado de relación con las aguas subterráneas:

- Especies halobiontes de aguas mineralizada. Este es el caso de *Arctodiaptomus salinus*.

- Especies tolerantes de aguas dulces, con adaptaciones específicas para soportar acusados periodos de sequía entre los que puede citarse a *Cyzicus grubei*, *Chyrocephalus sp* y *Triops cancriformis*.

- Especies tolerantes de aguas dulces o ligeramente mineralizadas características de ambientes más permanentes. Este es el caso de *Simocephalus vetulus* o *Chydorus sphaericus*.

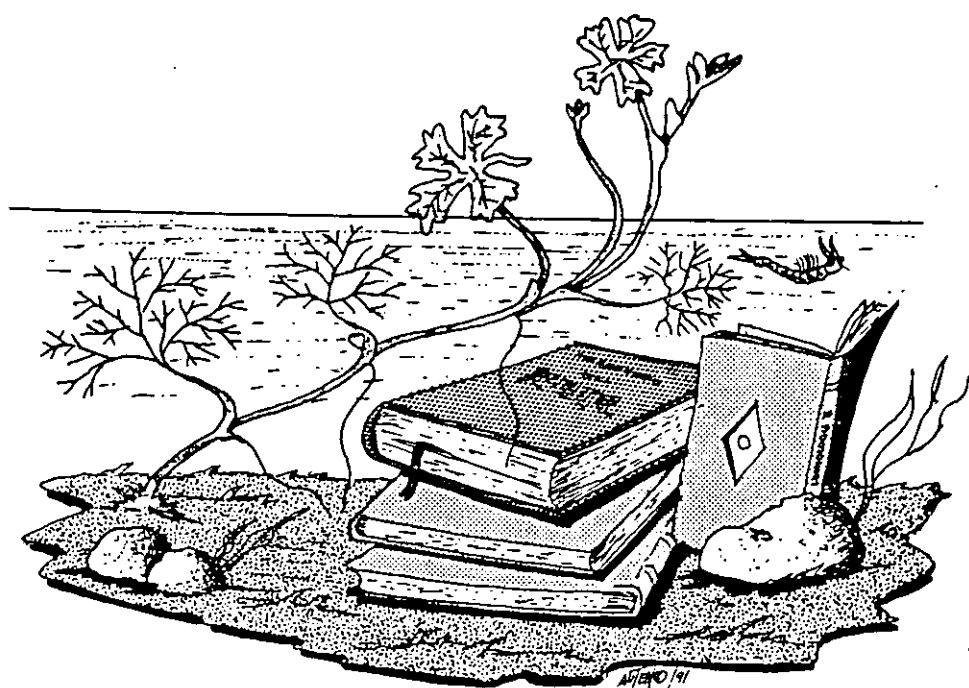
14.-Las diferentes tipologías estructurales conformadas mediante la utilización de factores morfométricos y fisiográficos, fisico-químicos y referidos a la biota estrictamente acuática y su integración utilizando como hilo conductor la sectorización

ambiental del área, han perfilado criterios genético-funcionales para clasificar los humedales en dos tipos básicos: epigénicos e hipogénicos, atendiendo fundamentalmente al carácter de los procesos hidrológicos tanto superficiales como subterráneos que en ellos se desarrollan.

- 15.-A través del cálculo de balances hídricos y del examen simultáneo del grado de saturación en ciertos minerales, en aguas superficiales y subterráneas, se demuestra que la entrada mayoritaria de agua en las lagunas hipogénicas en un ciclo hidrológico es subterránea, mientras que en las epigénicas es superficial.
- 16.-Igualmente se confirma que en aquellos momentos en que el nivel freático en las proximidades del humedal se encuentra por encima del nivel de la laguna se producen descargas de agua subterránea en la misma.
- 17.-Entre las lagunas del área del acuífero de Madrid se ha detectado la presencia de al menos dos modelos de funcionamiento, relacionados estrechamente con las condiciones litológicas y climáticas y que pueden sintetizarse de la siguiente forma:
  - Lagunas situadas en áreas de recarga del acuífero regional cuya fuente de alimentación hídrica principal es la lluvia y que sin embargo ven prolongados sus periodos de inundación por descargas esporádicas de agua subsuperficial con altos contenidos de  $\text{SiO}_2$  disuelto.
  - Lagunas situadas en áreas de descarga del acuífero regional que reciben agua subterránea de

forma más o menos continuada. La constante interacción entre aguas superficial y subterránea favorece procesos geoquímicos como los cambios de bases en presencia de aguas ricas en  $\text{Na}^+$ .

- 19.-En ambos casos, el agua situada por debajo de la superficie del terreno, ya sea subsuperficial o subterránea, juega un importante papel en el funcionamiento de los humedales por el efecto amortiguador de las variaciones de los niveles de agua, confiriendo en último término mayor estabilidad a estos sistemas.



## 9. BIBLIOGRAFIA



- ADAMS, G.D. & ZOLTAI, S.C. (1969). Proposed open water and wetland classification: 23-41. En: D.S. Lacate, D.S. (Compiler) Guidelines for biophysical land classification. Can. Forest. Serv. Publ. n. 1264. Dept. Fish and Forest. Ottawa: 23-41 pp.
  
- ADAMUS, P.R. & STOCKWELL, L.T. (1983). A method for wetland functional assesment. vol I. Critical review and evaluation concepts. US Dep. Transp. Washington DC. FHWA-IP 82-23: 1-176.
  
- AGUILO, M. (1983). El agua en Madrid. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Comunidad de Madrid. 250 pp.
  
- ALBERTO et al. (1979). Memoria y guía de las excursiones científicas. Estación experimental Aula Dei. Zaragoza. 109 pp.
  
- ALLEN, S.G. (1974). Chemical analysis of ecologycal materials. Oxford Blackwell. 565 pp.
  
- ALLUE, J.L. (1966). Subregiones fitoclimáticas de España. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Dirección General de Montes, Caza y Pesca Fluvial. Ministerio de Agricultura. Madrid.
  
- ALMARZA, C. (1984). Fichas hídricas normalizadas y otros parámetros hidrometeorológicos. Instituto Nacional de Meteorología, Turismo y Comunicaciones.
  
- ALONSO, M. (1985). Las lagunas de la España Peninsular: taxonomía, ecología y distribución de cladóceros. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona.

- ALONSO, M. (1987). Clasificación de los complejos palustres españoles. En: Bases científicas para la protección y gestión de los humedales españoles . Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales: 65-78.
  
- ALONSO, M. & COMELLES, M. (1981). Criterios básicos para la clasificación de las masas de agua continentales de pequeño volumen de España. Actas del I Congreso Español de Limnología: 35-49.
  
- ALONSO, M. & COMELLES, M. (1984). A preliminary grouping of the small epicontinental water bodies in Spain and distribution of Crustaceans and Charophyta. Verh int. Ver. Limnol. 22: 1699-1703.
  
- ALONSO, M. & COMELLES, M. (1987). Catálogo limnológico de las zona húmedas esteparias de la Cuenca del Duero. Junta de Castilla y León. Consejería de Fomento. 452 pp.
  
- ALONSO, M.; AMAT, J.A. & MONTES, C. (1986). Aspectos ecológicos de las zonas palustres de España. Información ambiental (MOPU), 8: 1-15.
  
- AMINOT, A. & CHAUSSEPIED, M. (1983). Manuel des analyses chimiques en milieu marin. CNEXO, Paris.
  
- ANDERSON, M.P. & MUNTER, J.A. (1981). Seasonal reversals of groundwater flow around lakes and the relevance to stagnation points and lake budgets. Water Resources Research, 17 (4): 1139-1150
  
- APHA (1985). Standar methods for the examination of water and wastewater 16th ed.

- ARAKEL, A.V.; JACOBSON, G. & LYONS, W.B. (1990). Sediment-water interaction as a control on geochemical evolution of playa lake systems in the Australian arid interior. Hydrobiología, 197: 1-12.
  
- BAILEY, R.G. (1976): Ecoregions of the United States. US Department of Agriculture, Forest Service. Ogden. UT.
  
- BAILEY, R.G. (1983). Delineation of ecosystem regions. Environmental Management, 7 (4):365-373.
  
- BAILEY, R.G. (1984). Testing -an ecosystem regionalization. Journal of Environmental Management, 19: 239-248.
  
- BAILEY, R.G. (1985). The factor of scale in ecosystem mapping. Environmental management, 9 (4): 271-276.
  
- BAILEY, R.G. (1988). D.D. Hook, et al. (ed) Expanding ecoregions to a worlwide basis. En: The ecology and management of wetlands vol 2: Management, use and value of wetlands.
  
- BALTANAS, A. (1985). Variación temporal de la fauna de invertebrados de una charca temporal. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Madrid.
  
- BAYLY, I.A.E. (1972). Salinity tolerance and osmotic behaviour of animals in athalasic saline and marine hypersaline waters. Ann. Rev. Ecol. Syst. 3 :233-268
  
- BEADLE, L.C. (1943) An ecological survey of some inland saline waters of Algeria. I. Lim. Soc.(Zool),

41:218-242.

- BEVERCONVE, A. M.; COX, N.; THOMAS, N.P. & YOUNG, S.D. (1973) Studies of the invertebrate fauna of a wet slack in a sand dune system. Arch Hidrobiol. 71 :487-516
  
- BERNUES, M. (1990). Limnología de los ecosistemas acuáticos del Parque Nacional de Doñana. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.
  
- BOELTER, D.H & VERRY, E.S. (1977). Peatland and water in the Northern Lakes States. USDA. Forest Service General Technical Report. NC-31. St. Paul. Minnesota.
  
- BOERSMA, L. (1965). Field measurement of hydraulic conductivity below a water table. Agronomy, Madison, 9: 22-233.
  
- BORN, S.M; SMITH, S.A. & STEPHENSON, D.A. (1974). The hydrologic regime of glacial-terrain lakes, with management and planning applications. Univ. of Wisconsin. Inland Lake Renewal and Management Demonstration Project. 73 pp.
  
- BOSCH, X.; CUSTODIO, E. & PASCUAL, M. (1990). Geochemical reactions in carbonate coastal aquifers, Catalonia, Spain. En: Selected Papers on Hydrogeology. 28 th. Int. Geol. Congress: 147-159.
  
- BROCK, M.A. (1986). Adaptations to fluctuations rather than extremes of environmental parameters. En: P. Deckker & D. Williams (eds). Limnology in Australia. Ink. Publishers: 131-140.

- BROWN, R.G. (1989). Hydrologic and water-quality characteristics of a wetland receiving wastewater effluent in St. Joseph, Minnesota. Wetlands, 9(2): 191-206.
  
- BRUNCE, R.G.H.; MORRELL, S.K. & STEL, H.E. (1975). The application of multivariate analysis to regional Survey. J. Environmental Management, 3: 151-165.
  
- CADAVID, S. (1977). Mapa estructural del techo del basamento del borde meridional de la Sierra de Guadarrama. Bol. geol. y minero, 88: 949-946.
  
- CALDERON, S. (1888). La sal común y su papel en el organismo del globo. An. Soc. Esp. Hist. Nat., 17: 367-434.
  
- CAPOTE, R. & CARRO, S. (1971). Mapa geológico de España. Escala 1:50.000. Hoja 536. Guadalajara. Instituto Geológico y Minero de España.
  
- CARPENTER, J.H. (1965). The accuracy of the winkler method for dissolved oxygen analysis. Limnol. oceanogr., 10: 135-140.
  
- CARTER, V. (1986). An overview of the hydrologic concerns related to wetlands in the United States. Can J. Bot., 64: 364-374.
  
- CARTER, V.; BEDINGER, M.S.; NOVITZKI, R.P. & WILEN, W.O. (1979). Water resources and wetlands. En: J.R. Greeson & J.E. Clark (eds). Wetlands Functions and Values. American Water Resources Ass. M.N.: 344-376.
  
- CARTER, V. & NOVITZKI, R.P. (1988). Some comments on

the relation between groundwater and wetlands. The ecology and management of wetlands, 1: 68-86.

- CASTILLO, V.; DIAZ SEGOVIA, A. & GONZALEZ ALONSO, S. (1988). Quantitative study of fluvial landscapes. Case study Madrid, Spain. Landscape and Urban Planning, 16: 201-217.

- CEOTMA (1984). Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología. MOPU. Series manuales n.3. 572 pp.

- CHEVOTAREV, I.I. (1955). Metamorphism natural waters in the crust of weathering geochimica & cosmochemica. Acta 8:22-48; 137-170; 198-212.

- CLARKE, F.W. (1924). The data of geochemistry. 5th ed. US Geol. Serv. Bull. 770 pp.

- COBELAS, M.A. (1982). Las algas de una charca ganadera temporal: su sucesión en relación con factores ambientales. Collectanea Botánica, 13(2): 709-722.

- COHEN, A.D.; CASAGRANDE, D.G.; ANDREJKO, M.J. & BEST, G.R. (eds) (1984). The okefenokee swamp. Wetland surveys. Los Alamos. M.N.

- COMELLES, M. (1985). Clave de identificación de las especies de carófitos de la Península Ibérica. Claves de identificación de la Flora y Fauna de las aguas continentales de la Península Ibérica. Asoc. Esp de Limnología, n.1. 35 pp.

- COWARDIN, L.M. (1982). Some conceptual and semantic problems in wetland classification and inventory.

Wildl. Soc. Bull., 10(1): 57-60.

- COWARDIN, L.M.; CARTER, V.; GOLET, F.C. & LAROE E.T. (1979). Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. Office of Biological Services, Fish and Wildlife Service US. Department of the Interior. Washington D. C. 131 pp.

- CRISP, D.T. (1966). Input and output of minerals for an Area of Pennine Moorland: the importance of precipitation, drainage, peat erosion and animals. Journal of Applied Ecology, 3: 327-348.

- CROWE, A.S. (1989). Numerical modelling of the groundwater contribution to the hydrological budget of lakes. Selected papers on Hydrogeology from the 28th Internat. Geolog. Congress. Washington DC.

- CUSTODIO, E. (1973). Recursos de agua de Lanzarote: reconocimiento general. Estudio científico de los Recursos de agua de las Islas Canarias. MOP-UNESCO-PNUD. Las Palmas. 77 pp.

- CUSTODIO, E. (1987). Peculiaridades de la hidrología de los complejos palustres españoles. En: Bases científicas para la protección de los humedales en España. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales: 43-63.

- CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R. (1983). Hidrología subterránea. Ed. Omega. 2ª edición. 2350 pp.

- DANIEL, C.C. (1981). Hydrology, geology and soils of pocosins: a comparison of natural and altered systems. En: Pocosin wetlands. C.J. Richardson; M.L. Matthews &

S.A. Anderson (eds). Hutchinson Ross Pub. Comp, Stroudsbury, PA : 69-108.

- DARCY, H.(1856). Les fontaines publiques de la Ville de Dijon. V. Dalmont, Paris. 674 pp.

-DAVIS, C. A. (1907).Peat, essays on the origin, uses and distribution in Michigan. En: Report State Board Geological Survey Michigan for 1906:95-395

- DAY, F.P.; WEST, S.K. & TUPACZ, E.G. (1988). The influence of groundwater dynamics in a periodically flooded ecosystem, the Great Dismal Swamp. Wetlands, 8:1-15.

- DE NICOLAS, J.P.; CASADO, L.G. & SAN JUAN, J.G. (1979). Climatología básica de la subregión de Madrid. MOPU. COPLACO, n. 1. 261 pp.

- DE PABLO, C.L.; GOMEZ, A. & PINEDA, F. (1987). Elaboration automatique d'une cartographie ecologique et son evaluation avec des parametres de la théorie de l'information. L'Espace Geographique, 2: 115-128.

- DE PABLO, C.L. & PINEDA, F. (1985). Análisis multivariante del territorio para una cartografía ecológica. Ensayo preliminar en la provincia de Madrid. An. Geogr. Univ. Complut., 5: 236-260.

- DEL PRADO, C. (1864). Descripción física y geológica de la provincia de Madrid. Junta General de Estadística. Madrid. Reeditado en 1975 por el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Madrid).

- DGOH (1990). Estudio de las zonas húmedas



continentales de España. Inventario, tipificación y relación con el régimen hídrico general y medidas de protección. INITEC.

- DIXON, W.J. & BROWN, M.B. (1987) (Eds). Biomedical Computer Programs. P Series. University of California Press. Berkeley.

- DOOGE, J. (1975). The water balance of bogs and fens. En: UNESCO Hydrology of Marsh- Ridden Areas. Proc. of Minsk Symposium. 1972. The UNESCO Press, Paris: 233-271.

- DREVER, J.I. (1988). The geochemistry of natural waters. Prentice Hall 2 ed. 437 pp.

- DUNNE, T. & BLACK, R.G. (1970). Partial area contributions to storm runoff in a small New England Watershed. Water Resources Research, 6: 1296-1311.

- EISENLOHR, W.S. (1966). Water loss from a natural pond through transpiration by hydrophytes. Water Resources Research, 2: 443-453.

- EISENLOHR, W.S. (1972). Hydrologic investigations of Prairie Potholes in North Dakota, 1959-68. US Geological Survey Professional Paper, 585-A. 102 pp.

- EPA (1983). Technical support manual: waterbody surveys and assessment for conducting use attainability analysis.

- EUGSTER, H.P. & HARDIE, L.A. (1978). Saline lakes. En: A. Lerman (ed). Physic and chemistry of lakes. Springer-Verlag: 237-239.

- EVANS, C.D. & BLACK, K.E. (1956). Duck production studies on the prairie potholes of South Dakota. US Fish and Wildlife Serv. Spec. Sci. Rep. nº 32: 59 pp.
  
- FERNANDEZ LOP, A. (1983). Estudio de la biocenosis de macroinvertebrados en las pequeñas masas de agua de la Sierra de Guadarrama. Tesis de Licenciatura. Universidad Complutense de Madrid.
  
- FERNANDEZ URIA, A. (1984). Hidrogeoquímica de las aguas subterráneas en el sector oriental de la cuenca de Madrid. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.
  
- FERNANDEZ URIA, A.; CHARLES FONTES J.; HERRAEZ I.; LLAMAS, M.R. & RUBIO P.L. (1985). Tridimensional groundwater chemical and isotopic as related to the Madrid Aquifer flow system. Estudios geol., 41: 229-236.
  
- FERNANDEZ URIA, A. & LLAMAS, R. (1983). La evolución de la bibliografía hidrogeológica de la región madrileña como índice del desarrollo de las aguas subterráneas de la zona. Hidrogeología y recursos hidráulicos, vol IX: 549-558.
  
- FLORIN, M.; MONTES, C. & RUEDA, F. (1991). Morphometric characteristics of La Mancha wetlands (central Spain) related to their origin and hydrological functioning. Wetlands .(en prensa).
  
- FOKKENS, B. & WEIJENBERG, J. (1968). Measuring the hydraulic potential of groundwater with the hydraulic potential probe. J. Hydrol, 6:306-313.

- FONT, I. (1983). Climatología de España y Portugal. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.
  
- FREEZE, R.A. & WITHERSPOON, P.A. (1966). Theoretical analysis of regional groundwater flow: 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. Water Resources Res., 2: 641-656.
  
- FREEZE, R.A. & CHERRY J.A. (1979). Groundwater. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
  
- FUSTER, J.M. & DE PEDRO, F. (1956). Mapa geológico de España. Escala 1:50.000; Hoja n. 533. San Lorenzo de El Escorial. Instituto Geológico y Minero de España.
  
- GARCIA VALDECASAS, A. (1981). Las hidracnelas de la Sierra de Guadarrama. Tesis de Licenciatura. Universidad Complutense de Madrid.
  
- GARCIA VALDECASAS, A.; FERNANDEZ LOP, A. & CAMACHO, I. (1984). Recurrence and equilibrium of temporal ponds of a mountain range in Central Spain. Arch. fur. Hydrobiol., 102 (1): 43-51.
  
- GAUTIER, H. (1928). Recherches sur la faune des eaux continentals de l'Algérie et de la Tunisie. Imp. Minerva, Alger, 416 pp.
  
- GEORGE, D.G. & MAITLAND, P.S. (1984). The fresh water of Shetland: physical and morphometric characteristics of lochs. Freshwater biology, 14: 95-107.
  
- GIBBS, R.J. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. Science, 170: 1088-1090.

- GOLET, F.C. & LARSON, J.S. (1974) Classification of freshwater wetlands in the glaciated Northeast. Resource publication 116. Bureau of Sport Fisheries and Wildlife. Washington.
  
- GOLLOP, J.B. (1965). Wetland inventories in western Canada. Trans. Cong. Inter. Gamc. Biol., 6: 249-264.
  
- GONZALEZ BERNALDEZ, F. (1982). Análisis ecosistémico de recursos naturales. Opiniones CIFCA. Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2: 5-33.
  
- GONZALEZ BERNALDEZ, F. (1987). Las zonas encharcables: el marco conceptual. En: Bases científicas para la protección y gestión de los humedales en España. Real Academia de Ciencia Exactas, Físicas y Naturales: 9-30.
  
- GONZALEZ BERNALDEZ, F. (1988). Typology of wetlands and evaluation of the resources they represent. Proc. Intern. Symp. on Hydrology of wetlands in Semiarid and Arid Regions. Sevilla : 7-36.
  
- GONZALEZ BERNALDEZ, F. & DIAZ PINEDA, F. (1978). Descripción automática de la vegetación (I). Anales de edafología y agrobiología, 37(56): 523-537.
  
- GONZALEZ BERNALDEZ, F.; HERRERA, P; LEVASSOR, C.; PECO B.; SASTRE, A. (1987a). Las aguas subterráneas en el paisaje. Investigación y ciencia, 127: 8-17.
  
- GONZALEZ BERNALDEZ F.; HERRERA, P.; SASTRE, A.; REY J.M. & VICENTE LAPUENTE, R. (1987b). Comparación preliminar de los ecosistemas de descarga de aguas

subterráneas en las cuencas del Duero y del Tajo. Hidrología y recursos hidráulicos, vol XI: 19-34.

- GONZALEZ BERNALDEZ, F.; MONTES, C.; HERRERA, P.; BESTEIRO, A.G. & SASTRE, A. (1988). Genetical typology of the Madrid Aquifer wetlands. Proc. Internat. Symp. on Hydrology of wetlands in semiarid and arid regions. Sevilla.

- GONZALEZ BERNALDEZ, F.; MONTES, C.; BESTEIRO, A.G.; HERRERA, P. & PEREZ, C. (1989a). Los humedales del acuífero de Madrid: inventario y tipología según su origen y funcionamiento. Canal de Isabel II. 92 pp.

- GONZALEZ BERNALDEZ, F.; REY, J.M.; LEVASSOR, C. & PECO, B. (1989b). Landscape ecology of uncultivated lowlands in central Spain. Landscape ecology, 3(1): 3-18.

- GONZALEZ BERNALDEZ, F.; HERRERA, P.; PECO, B.; SASTRE, A. (1985). Hidrogeochemical structure of the Madrid aquifer from numerical analysis of chemical data. Groundwater (enviado)

- GOPAL, B.; TURNER, R.E.; WETZEL, R.G. & WHIGHAM, D.R. (1982). Wetlands ecology and management. National Institute of Ecology and International Scientific Publications, Luchnow Publishing House. India. 514 pp.

- GOSSELINK, J.G. & TURNER, R.E. (1978). The role of hydrology in freshwater wetland ecosystems. En: R.E. Good; D.F. Whigham & R.L. Simpson (eds). Freshwater Wetlands. Ecological Processes and Management Potential. Academic Press, New York. 378 pp.

- GREESON, P.E.; CLARK, J.R. & CLARK, J.E. (Eds) (1979). Wetland functions and values: the state of our understanding. American Water Resources Association, Minneapolis. 674 pp.
  
- HAINES, T.A. & AKIELASZEK, J. (1983). A regional survey of chemistry of headwater lakes and streams in New England: Vulnerability to Acidification. Air Pollution and Acid Rain. Report n. 15 Offic. Research and Develop. US Environm. Protec. Agency, US Dept. of the Interior. 141 pp.
  
- HAKANSON, L. (1981). A manual of Lake morphometry. Springer-Verlag. Berlin. 77 pp.
  
- HAMMER, U.T. (1978) The saline lakes of Saskatchewan. Chemical characterization. Int. Revue. Ges. Hydrobiol., 63: 311-335.
  
- HAMMER, U.T. (1986). Saline lake ecosystems of the world. Junk Publ. 616 pp.
  
- HAMMER, U.T.; SHANES, J. & HAYNES, R.C. (1983). The distribution and abundance of algae in saline lakes of Saskatchewan, Canadá. Hydrobiologia, 16: 1-26.
  
- HARTLAND-ROWE, R. (1966). The fauna and ecology of temporary pools in Western Canada. Verh. int. Verein Limnol., 16: 577-584.
  
- HARVEY, J.W.; CHAMBERS, R.M. & ODUM, W.E. (1987). Groundwater transport between Hillslopes and Tidal Marshes. En: Wetlands Hydrology. Proc. National Wetland Symposium. Chicago. Kusler, J.A. & Brooks, G. (eds): 270-276.

- HEISKARY, S. A.; WILSON, C.B. & LARSEN, D.P. (1987). Analysis of regional patterns in lake water quality: using ecoregions for lake management in Minnesota. Lake and Reservoir Management, 3: 337-344
  
- HEM, J.D. (1989). Study and interpretation of the chemical characteristics of Natural Water. 3<sup>a</sup> ed. Geological Survey Water Supply, Paper 1473.
  
- HEMOND, H.F. (1980). Biogeochemistry of Thoreau's Bog, Concord, Massachusetts. Ecol. Monogr., 50: 507-526.
  
- HENJY, S. & HUSAK, S. (1978). Higher Plant Communities. En: D.Dykyjova & J. Kvet (eds). Pard Littoral Ecosystems. Springer-Verlag: 23-64.
  
- HERNANDEZ PACHECO, E. (1955). Fisiografía del solar Hispano. Mem. R. Acad. Ciencias Físicas y Naturales, 16 (2): 1-793.
  
- HERNANDEZ PACHECO, E. et al. (1969). Proceso formativo y época de la Sierra de Guadarrama. Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. 67, n. 3.
  
- HERRAEZ, I. (1983). Análisis de las variaciones de los isótopos ambientales estables en el sistema acuífero Terciario Detrítico de Madrid. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.
  
- HERRERA, P. (1987). Aspectos ecológicos de las aguas subterráneas en la facies arcósica de la cuenca de Madrid. Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá de Henares, Madrid.

- HETLING, L.J.; HARR, T.E.; FUHS, G.W. & ALLEN, S.P. (1977). Trophic status and nutrient balance for Canadarago Lake (New York). En: L. Seyb & K. Randolph (eds). North American Project. A study of US water bodies. US Environmental Protection Agency, Ecological Research Serie, EPA- 600/3-77-086: 205-241.
  
- HEURTEAUX, P. (1988). Mesure de la salinité des eaux naturelles en hydrologie et en hidrobiologie. Essai pour une standardisation de l'expression des résultats. Ecología mediterránea, XIV (3/4): 149-166.
  
- HILL, M.O. (1979). A FORTRAN program for detrented correspondence analysis and reciprocal averaging. Cornell University. Ithaca, N.Y. 52 pp.
  
- HOLLANDS, G.G. (1987). Assessing the relationship of groundwater and wetlands. Proc National Wetland Symposium, Chicago: 240-242.
  
- HORTON, R.E. (1933). The role of infiltration in the hydrological cycle. Trans. Am. Geophys. Union, 14: 446-460.
  
- HOWARD-WILLIAMS, C. (1985). Cycling and retention of nitrogen and phosphorus in wetlands: a theorical and applied perspective. Freshwater biol., 15: 391- 431.
  
- HUBBERT, M.K. (1940). The theory of groundwater motion. Journal of Geol., 48: 785-944.
  
- HUGUES, R.M. & OMERNIK, J.M. (1981). A proposed approach to determine regional patterns in aquatic ecosystems. Adquisition and utilization of aquatic



habital inventory information. Proc. Symp. Held. Portland. Oregon. 92-102 pp.

- HUGUES, R.M.; REXTAD, E. & BOND, G.E. (1987). The relationship of aquatic ecoregions, river basins and physiographic provinces to the ichthyogeographic regions of Oregon. Copeia, 2: 423-432.

- HUGUET DEL VILLAR, E. (manuscrito de 1950, ed. en 1983). Geo-edafología. Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona. Colección geocrítica. Barcelona.

- HUTCHINSON, G.E. (1975). A Treatise on Limnology. Vol.I, Part. 1. Geography and Physics of Lakes. John Wiley & Sons, New York.

- HYNES, H.B.N. (1975). The stream and its valley. Verh. Internat. Verein Limnol., 19: 1-15.

- IGME (1971). Mapa geológico de España. Escala 1:200.000. Hoja 45: Madrid. Madrid.

- IVANOV, K.E. (1981). Water movement in mirelands. Academic Press. New York. 276 pp.

- JENSEN, S. (1979). Classification of lakes in Southern Sweden on the bases of their macrophyte composition by means of multivariate methods. Vegetatio, 39: 129-146.

- JESSEN, O. (1946). La Mancha. Contribución al estudio geográfico de Castilla La Nueva. Est. Geog. 23: 269-312.

- JOHN, P.H.; LOCK, M.A. & GIBBS, M.M. (1977). Two new methods for obtaining water samples from shallow aquifers and litoral sediments. Int. Environm. Qual, 6:322-324.
  
- KADLEC, J.A. (1983). Water budgets for small diked marshes. Water Resources Bull., 19: 223-229.
  
- KADLEC, J.A.; WILLIAMS, R.B & SCHEFFE, R.D. (1988). Wetland evapotranspiration in temperature and arid climates. En: D.D. Hook et al. (eds). The ecology and management of wetlands. vol I.
  
- KILHAM, P. (1990). Mechanisms controlling the chemical composition of lakes and rivers: Data from Africa. Limnol. Oceanogr., 35(1): 80-83.
  
- KNIGHT, R.L.; WINCHESTER, B.H. & HIGMAN, J.C. (1985). Ecology, hydrology and advanced wastewater treatment potential of an artificial wetland in North-Central, Florida. Wetlands, 5: 167-180.
  
- KOERSELMAN, W. (1989). Groundwater and surface water hydrology of a small groundwater fed fen. Wetlands Ecology and Management, 1 (1): 31-43.
  
- KUBLY, D.M. (1982). Physical and chemical features of playa lakes in Southeastern California. USA. Arch Hydrobiol. Suppl., 62(3/4): 491-525.
  
- KULCZYNSKY, S. (1949). Peat bogs of Polesie. Acad. Pol. Sci. Mem. Serie B, N° 15. 356 pp.
  
- KURIMO, H. (1984). Simultaneous groundwater table fluctuation in different parts of Virgin Pine Mires.

Silva Fennica, 18(2): 151-186.

- LABAUGH, J.W. (1986). Wetland ecosystem studies from a hydrologic perspective. Water Resources Bull., 22: 1-10.

- LABAUGH, J.W. & WINTER, T.C. (1984). The impact of uncertainties in hydrologic measurement on phosphorus budgets and empirical models for two Colorado Reservoirs. Limnology and Oceanography, 29: 322-339.

- LANGBEIN, W.B. (1961). Salinity and hydrology of closed lakes. Geological Survey Professional Paper, 412.

- LARSEN, D.P. & OMERNIK, J.M. (1986). Correspondence between spatial patterns in fish assemblages in Ohio streams and aquatic ecoregions. Environmental Management, 10 (6): 815-828.

- LARSON, S.P.; MCBRIDE, M.S. & WOLF, M.S., R.J. (1975). Digital models of a glacial outwash aquifer in the Pearl-Sallie Lakes area, west-central Minnesota. US Geol. Surv. Water Resourc. Invest. 40-75: 39 pp.

- LEE, D.R. (1977). A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries. Limnol. Oceanogr., 22: 140-147.

- LEE, D.R.; CHERRY, J.A. & PICKENS, J.F. (1980). Groundwater transport of a salt tracer through a sandy lakebed. Limnol. Oceanogr., 25 (1): 45-61.

- LEGENDRE, P. & LEGENDRE, V. (1984). Postglacial dispersal of freshwater fishes in the Quebec peninsula. Can. J. Fis. Aquat. Sci. 41: 1781-1802.

- LIKENS, G.E. & BORMANN, F.H. (1974). Linkages between terrestrial and aquatic ecosystems. BioScience, 24(8): 447-456.
- LINACRE, E.T. (1976). Swamps. En: J.L. Menteith (ed). Vegetation and the Atmosphere, Vol 2. Case studies. Academic Press, London: 329-347
- LINACRE, E.T.; HICKS, B.B., SAINTY, G.R. & GRAUZE, G. (1970). The evaporation from a swamp. Agricultural meteorology, 7: 375-386.
- LINARES, L. & DEL VALLE, M. (1986). Relaciones entre la laguna de Fuente de Piedra y la piezometría de los acuíferos de la cuenca (Málaga). El agua en Andalucía, vol II: 345-355.
- LLAMAS, M.R. (1982). Notas sobre peculiaridades de los sistemas hídricos de las zonas húmedas. En: Las zonas húmedas de Andalucía. Dirección General de Medio Ambiente. MOPU: 77-85.
- LLAMAS, M.R. (1986). Las aguas subterráneas de Madrid: esperanzas y preocupaciones, datos e incertidumbres, posibles líneas de acción. En : Jornadas sobre la explotación de aguas subterráneas en la Comunidad de Madrid: 13-36. Canal de Isabel II.
- LLAMAS, M.R. (1987). Análisis del funcionamiento hidráulico del acuífero detrítico de Madrid. Ensayos de bombeo y modelos hidrodinámicos. Informe para Canal de Isabel II.
- LLAMAS, M.R. & LOPEZ VERA, F. (1975). Estudio sobre

los recursos hidráulicos subterráneos del Area Metropolitana de Madrid y su zona de influencia: avance de las características hidrogeológicas del Terciario Detrítico de la cuenca del Tajo. Rev. Agua,. 88: 36-55.

- LLORCA, A. & RUIZ, M. (1987). Apuntes para una metodología objetiva de sectorización territorial. Estudios territoriales, 25: 107-119.

- LLORCA, A.; DE PABLO, L. & RUIZ, M. (1988). Caracterización del territorio: el empleo de procedimientos multivariantes. Congreso Europeo de Ordenación del Territorio, Valencia, Junio 88.

- LOCK, M.A. & JOHN, P.H. (1978). The measurement of groundwater discharge into a lake by a direct method. Int. Revue Hidrobiol., 63 (2): 217-275.

- LODGE, A.M.; KRABBENHOFT, D.P. & STRIEGL, R.G. (1989). A positive relationship between groundwater velocity and submersed macrophyte biomass in Sparkling Lake, Wisconsin. Limnol & Oceanogr., 34 (1): 235-239.

- LOPEZ, P. (1983). Aguas salinas epicontinentales próximas a la costa mediterránea española. Estudio del medio. Tesis Doctoral. Universidad Barcelona. 311 pp.

- LOPEZ CAMACHO, B. (1977). Estudio del agua subterránea en medios heterogéneos y anisotrópos mediante un modelo digital bidimensional. Aplicación a la región de Madrid. Trabajo correspondiente a la beca concedida en 1975 por el colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 1160 pp.

- LOPEZ VERA, F. (1975). Hidrogeología regional de la cuenca del río Jarama en los alrededores de Madrid. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
  
- LOPEZ VERA, F. (1977). Modelo de sedimentación de los materiales detríticos de la Fosa de Madrid. Tecniterrae, 18: 64-69.
  
- MAB (1974). International working groups on Project 5. Ecological effects of human activities on the value and resources of lakes, marshes, rivers, deltas, estuaries and coastal zones. MAB Report Series. nº 21 UNESCO. 80 pp.
  
- MACKERET, F.J.H. et al. (1978). Water analysis: some revised methods for limnologist. Freshwater Biological Association Sci. Pub. 36. 120 pp.
  
- MARGALEF, R. (1949). Datos para la hidrobiología de la Sierra de Guadarrama. P. Int. Biol. Apl., 6: 5-21.
  
- MARGALEF, R. (1987). Teoría y modelado de los sistemas fluctuantes. En: Bases científicas para la protección y gestión de los humedales en España. Real Academia de Ciencias Físicas, Exactas y Naturales: 31-41.
  
- MARTIN, A.C.N.; HOTCHKISS, F.M.; UHLER, F.M. & BOURN, W.S. (1953). Classification of wetlands of the US. Special Sci. Report. Wildlife n. 20 US Fish and Wildlife Service. Washington.
  
- MARTIN DE AGAR, P. (1984). Ecología y planeamiento territorial: metodología y estudio de casos en la región murciana. Secretariado de Publicaciones.

Universidad de Murcia. 57 pp.

- MARTIN ESCORZA, C. (1977). Aplicación de las imágenes LANDSAT al estudio de las relaciones entre la "raña" y la tectónica pliocena en la meseta Central española. Tecniterrae, S-133: 1-15.

- MARTIN ESCORZA, C. & HERNANDEZ ENRILE, J.L. (1972). Contribución al conocimiento de la geología del Terciario Occidental de la Fosa del Tajo. Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Geol), 70:171-190.

- MARTINEZ ALFARO, P.E. (1977). Hidrogeología de los materiales terciarios y cuaternarios de la cuenca del río Manzanares. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

- MARTINO, P. (1988). Limnología de las lagunas salinas españolas. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.

- MATVEYEV, A.A. & BASHMAKOVA, O.I. (1967). Chemical composition of atmospheric precipitation in some regions of the URSS. Soviet Hydrology. Select papers n. 5: 480-491.

- McBRIDE, M.S. & PFANNKUCH, H.O. (1975). The distribution of seepage within lakes. J. Res. US. Geol. Surv., 3: 505-512.

- MEINZER, O.E. (1923). Outline of groundwater hydrology with definitions. US Geol. Survey Water Supply. Paper 494. 71 pp.

- MEYBOOM, P. (1966). Unsteady groundwater flow near a

willow ring in hummocky moraine. J. Hydrol., 4:38-62.

- MIJAILOV, L. (1989). Hidrogeología. Ed. Mir. Moscú. 286 pp.

- MILLAR, J.B. (1973). Wetlands classification in western Canada. Canadian wildlife service. Report Series n. 37. Ottawa.

- MILLER, D.H. (1978). The factor of scale: ecosystem, landscape, mosaic, and region. En: Sourcebook on the environment. Hammond, K.A. (ed). University of Chicago Press. Chicago: 63-88.

- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1986). Métodos oficiales de análisis. Tomo III. Dirección General de Política Alimentaria. Madrid.

- MITSCH, W.J.; DORGE, G.L. & WIEMHOFF, J.R. (1979). Ecosystem dynamics and a phosphorus budget of an alluvial Swamp in Southern Illinois. Ecology, 60: 1116-1124.

- MITSCH, W.J. & GOSSELINK, J.G. (1986). Wetlands. Van Nostrand Reinhold. 539 pp.

- MONTANARI, J.H. (1988). Planning and organizing for large wetland resource inventories. En: D.D. Hook (ed). The ecology and management of wetland. vol 2: Management, use and value of wetland.

- MONTES, C. & MARTINO, P. (1987). Las lagunas salinas españolas. En: Bases Científicas para la Protección y Gestión de los humedales en España. Real Academia de Ciencias Físicas, Exactas y Naturales: 96-145.



- MOORE, P.D. & BELLAMY D.J. (1974). Peatlands. Springer- Verlag, New York. 221 pp.
  
- MOPU (1984). Geografía y medio ambiente. Monografías de la Dirección General de Medio Ambiente. 303 pp.
  
- MORENO GUERRA, R. & LOPEZ VERA, F. (1979). Análisis de flúor y silicio en las aguas subterráneas del Terciario Detrítico de Madrid. II Simposio Nacional de Hidrogeología. Pamplona :691-702.
  
- MORTIMER, C.H. (1953). A review of temperature measurent in Limnology. Mitt Int. Ver. Limnol. Commun., 1. 25 pp.
  
- MOYA MEJIAS, J.L.; RECIO, J.M. & GIRALDEZ; J.V. (1986). Determinación del flujo base en las lagunas endorreicas. El agua en Andalucía, I: 185-196.
  
- MUNTER, J.A. (1979). Groundwater modeling of three lake aquifer systems in Wisconsin. MS. thesis Univ. Wisconsin 100 pp.
  
- MUNTER, J.A. & ANDERSON, M.P. (1981). The use of groundwater flow models for stimating lake seepage rates. Groundwater, 19: 608-616.
  
- NOVITZKI, R.P. (1979). Hidrologic characteristics of Wisconsin's wetlands and their influence on floods, stream flow and sediment. En: P.E. Greeson; J.R. Clark & J.E. Clark (eds). Wetland functions and values: the state of our understanding. American Water Resources Ass. M.N.

- NOVITZKY, R.P. (1982). Hidrology of Wisconsin wetlands. Information Circular 40, US. Geological Survey: 1-22.
  
- NOVITZKI, R.P. (1989). Wetland hydrology. En: S.K. Majumdar; R.P. Brooks; F.J. Brenner & R.W. Tiner (eds). Wetland ecology and conservation: emphasis in Pennsylvania. The Pennsylvania Academy of Science. 395 pp.
  
- NUTTLE, W.K. & HARVEY, J.W. (1987). Geomorphological controls on subsurface transport in two salt marshes. En: J.A. Kusler & G. Brooks (eds). Wetlands Hydrology. Proc Nat. Wetland Symposium. Chicago: 253-261.
  
- OCTAVIO, F. & LOPEZ CAMACHO, B. (1976). Relaciones entre el flujo subterráneo y la calidad química de las aguas en formaciones continentales. Simp. Nac. Hidrogeología, 2: 1078-1101.
  
- PARDO, L. (1948). Catálogo de los lagos de España. Biología de las aguas continentales VI. Inst. For. Inv. Exp. Madrid. 522 pp.
  
- PARRY, R.H.G. (1971). A simple driven piezometer. Geotechnique, 21: 163-167.
  
- PEINADO MORENO, M. (1973). Evolución metamórfica en el Macizo El Escorial- Villa del Prado (Sistema Central Español). Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
  
- PENMAN, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, bar soil and grass. Proc Roy. Soc., A 193: 120.

- PENMAN, H.L. (1956). Evaporation: an introductory survey. Netherlands Journal of Agricultural Science, 4: 9-29.
  
- PHILBERT, F.J. (1973). A comparative study of the effect of sample preservation by freezing prior to chemical analysis of Great lakes water. Proc. 16th Gt. Lakes Re. 5: 282-293.
  
- PHILLIPS, K.N. & VAN DENBURGH, A.S. (1971). Hydrology and geochemistry of Albert Summer, and Goose Lakes and other closed basin lakes in South-Central Oregon. US Geological Survey Professional Paper 502-B, 86 pp.
  
- PLANS, P. (1969). Problemas del endorreismo español. Rev. R. Acad. Ciencia Exactas, Fisicas y Naturales, 63: 271-309.
  
- PLUMMER, L.N.; JONES, B.F. & TRUESDALL, A.H. (1976). WATEQ- a FORTRAN IV versión of WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. US Geol. Survey. Water Res. Invest., 76-13. 61 pp.
  
- POTONIE, R. (1908). Aufbau und vegetation der Moore Norddentschlands. Engler's Bot. Jahrb. 90.
  
- POWERS, C.F.; SANVILLE, W.D. & STAY, F.S. (1977). Waldo Lake, Oregon. En: L. Seyb & A. Randolph (eds). North American Project- A study of US Water Bodies. US Environmental Protection Agency Ecological Research Series. EPA- 600/3-77-086: 271-287.
  
- PRIBAN, K. & ONDOK, J.P. (1980). The daily and seasonal course of evapotranspiration from a central

European sedge-grass marsh. Journal of Ecology, 68: 547-559.

- QUIRANTES, J. (1965). Nota sobre las lagunas de Bujaraloz-Sástago. Geographica, 12: 30-34.

- RAMIREZ DIAZ, L.; GARCIA NOVO, F. & MERINO, J. (1976). On the ecological interpretation of principal components in factor analysis. Oecol. Plant., 11(2): 137-141.

- RAMOS FERNANDEZ, A. (1979). Planificación física y ecológica. Modelos y métodos. Ed. Magisterio Español. S.A. 216 pp.

- REBOLLO, L. (1977). Estudio hidrogeológico regional de la cuenca media y baja del río Guadarrama. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

- RENATUR (1982). Inventario de las zonas húmedas de la provincia de Madrid. Diputación provincial de Madrid.

- RESH, U.H.; BROWN, A.V.; COVICH, A.P.; GURTZ, M.E.; LI, H.W.; MINSHALL, G.W.; REICE, S.R.; SHELDON, A.L.; WALLACE, J.B. & WISSMAR, R.C. (1988). The role of disturbance in stream ecology. J. N. Am. Benthol. Soc. 7(4): 433-455.

- REY BENAYAS, J.M.; PEREZ PEREZ, C.; GONZALEZ BERNALDEZ, F. & ZABALETA, M. (1989). Tipología y cartografía por fotointerpretación de los humedales de las cuencas del Duero y Tajo. Mediterranee. Ser. Biol. 12: 5-26.

- RINTANEN, T. (1982). Botanical lake types in Ginnish Lapland. Ann. Bot. Fennici, 19: 247-274.
- RODHE, A. (1985). Groundwater contributions to streamflow in the Lake Gardsjon area. Ecological bull., 37: 75-85.
- ROHM, C.M.; GIESE, J.W. & BENNETT, C.C. (1987). Evaluation and aquatic ecoregion classification of streams in Arkansas. Journal of Freshwater ecology, 4 (1):1277-140.
- ROWE, J.S. & SHEARD, J.W. (1981). Ecological land classification: a survey approach. Environmental management, 5: 451-464.
- RUBIO, P.L. (1984). Hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sector occidental de la cuenca de Madrid. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.
- RYCHNOVSKA, M.; KVET, J.; GLOSER, J. & JAKRLOVA, J. (1972). Plant water relations in three zones of grassland. Acta Scientiarum Naturalium, 6: 1-38.
- RYCROFT, D.W.; WILLIAMS, D.J.A. & INGRAM, H.A.P. (1975). The transmission of water through peat II. Review J. Ecol., 63: 535-556.
- SAN JOSE LANCHI, M.A. (1976). Mapa geológico de España. Escala 1/50.000. Hoja 583. Arganda. Serie Magna. IGME.
- SASTRE, A. (1978). Hidrogeología regional de la cuenca terciaria del río Alberche. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

- SASTRE, A. (1984). Las aguas subterráneas y los humedales de Madrid. I Congreso Español de Geología. Tomo IV: 383-397.
  
- SATHER, J.H. & SMITH, R.D. (1984). An overview of major wetland functions and values. US Fish Wildl. Serv. FWS/OBS-84/18: 1-68.
  
- SCHUMANN, D. (1973). Annual variation of seepage of lakes in the moraine area of the German Democratic Republic. Assoc. Hydrol. Sci. Pub., 109: 101-108.
  
- SHAPIRO, J. & PFANNKUCH, H. (1973). The Minneapolis Chain of Lakes, a Study of urban drainage and its effects. University of Minnesota, Limnological Research Center. Report 9. 250 pp.
  
- SHAW, S.P. & FREDINE, C.G. (1956). Wetlands of the US. Circular 39. Fish and Wildlife Service. Washington.
  
- SIEGEL, D.I. (1983). Groundwater and the evolution of patterned mires, Glacial Lake Agassiz peatlands, Northern Minnesota. Journal of Ecology, 71: 913-921.
  
- SIEGEL, D.I. (1988). A review of the recharge-discharge function of wetlands. En: D.D. Hook et al. (eds). The ecology and management of wetlands. Vol 1.
  
- SIEGEL, D.I. & GLASER, P.H. (1987). Groundwater flow in a bag-fen complex, lost river Peatland, northern Minnesota. Journal of Ecology, 75: 743-754.
  
- SNEDECOR, G.N. & COHRAN, W.G. (1976). Statistical methods. Iowa. State University Press. Ames. 593 pp.

- SOKAL, R.R. & ROHLF, F.J. (1979). Biometría. Principios y métodos estadísticos en la investigación biológica. H. Blume Edic. Madrid. 832 pp.
- SOUSA, W.P. (1984). The role of disturbance in natural communities. Ann. Rev. Ecol. Syst., 15: 353-391.
- STEPHENSON, G.R. & FREEZE, R.A. (1974). Mathematical simulation of subsurface flow contributions to snowmelt runoff. Reynolds Creek Watershed. Idaho. Water Resources Research, 10: 284-294.
- STEWART, R.E. & KANTRUD, H.A. (1971). Classification of natural ponds and lakes in the glaciated prairie regions. US Fish and Wildl. Serv. Resourc. Publ. 92. 57 pp.
- THIERY, A. (1978). Étude des communautés d'Invertébrés aquatiques dans différents biotopes des marais du Plan du Bourq. Thèse de spécialité, Université de Droit, d'Economie et des Sciences de Marseille, 157 pp.
- THORNTON, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev., 38: 55-94.
- THORNTON, C.W. & MATHER, J.R. (1955). The water budget and its use in irrigation. USDA Yearbook of Agriculture, USDA Washington: 346-358.
- TINER, R.W. Jr. (1989). Classification of wetland ecosystems. En: S.K. Majumdar ; R.P. Brooks; R.J.

Brenner; R.W. Tiner (eds). Wetlands ecology and conservation: emphasis in Pennsylvania. 395 pp.

- TOTH, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. J. Geophys. Res., 68: 4795-4812.

- TOTH, J. (1966). Mapping and interpretation of field phenomena for groundwater reconnaissance in a prairie environment. Alberta. Canadá. Bull Int. Assoc Sci Hydrol., 9, 20

- TOTH, J. (1972). Properties and manifestations of regional groundwater movement. 24th J.G.C. Section 11 Montreal: 153-163.

- TOTH, J. (1984). The role of regional gravity flow in the chemical and thermal evolution of groundwater. Proc. 1<sup>st</sup> Canadian-American Conference on Hydrogeology.

- USFWS (1984). Proc of the National Wetland value Assesment Workshop. US Dep of the Interior Washington DC.

- USHER, M.B. (ed) (1986). Wildlife Conservation Evaluation. Chapman and Hall.

- VALIELA, I.; TEAL, J.M.; VOLKMANN, S.; SHAFER, D. & CARPENTER, E.J. (1978). Nutrient and particulate fluxes in a salt marsh ecosystem: Tidal exchanges and inputs by precipitation and groundwater. Limnology and Oceanography, 23: 798-812.

- VAN DER VALK. A.G. (1981). Succession in Wetlands: A Gleasonian Approach. Ecology, 62: 688-692.



- VEGAS, R. & PEREZ, A. (1974). Mapa geológico de España. Escala 1:50.000. Hoja 582. Getafe. Serie Magna. IGME.
  
- VERHOEVEN, J.T.A. (1986). Nutrient dynamics in minerotrophic peat mires. Aquat. Bot., 25: 117-137.
  
- VERRY, E.S. & TIMMONS, D.R. (1982). Waterborne nutrient flow through an upland-peatland watershed in Minnesota. Ecology, 63: 1456-1467.
  
- VIDAL, C. (1942). La línea morfométrica meridional de la Sierra de Guadarrama. Bol. R. Soc. Esp. His. Nat., 40:117-132.
  
- VIDAL-ABARCA, M.R. (1985). Las aguas superficiales de la Cuenca del río Segura (SE de España). Caracterización físico-química en relación al medio físico y humano. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
  
- VIDAL-ABARCA, M.R.; MONTES, C.; SUAREZ, M.L. & RAMIREZ DIAZ, L. (1990). Sectorización ecológica de cuencas fluviales: aplicación a la cuenca del río Segura (SE de España) Anales de Geografía de la Universidad Complutense, 10: 149-182.
  
- VILLAROYA GIL, F. (1977). Hidrogeología regional del Neogeno detrítico y cuaternario de la cuenca del río Henares. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
  
- VILLAROYA GIL, F. & REBOLLO FERREIRO, L. (1976). Contribución al conocimiento hidrogeológico del Mioceno detrítico en la cuenca del río Henares. Simposium

Nacional Hidrogeología. Valencia: 421-435.

- WARREN, C.E. (1979). Toward classification and rationate for watershed management and stream protection. US Environm. Protect. Agency. Corvallis O.R. EPA-600/3-79-059. Corvallis. 142 pp.
  
- WEBER, C.A, (1908). Aufban und vegetation der Moore Norddentschlands, Engler's Bot Jahrb, 40: 19-34.
  
- WETZEL, R.G. (1981). Limnología. Omega. Barcelona. 679 pp.
  
- WHITTIER, T.R.; HUGUES, R.M. & LARSEN D.P. (1988). The correspondence between ecoregions and spatial patterns in stream ecosystems in Oregon. Can J. Fish. Aquatic. Sci (en prensa).
  
- WIGGINS G.; MACKAY; R.J. & SMITH, J.M. (1980). Evolutionary and ecological strategies of animals in annual temporary pools. Arch. Hydrobiol. 58(1/2): 97-206.
  
- WILLIAMS, R.E. (1968). Flow of groundwater adjacent to small closed basins in glacial till. Water Resources Research, 4: 777-783.
  
- WILLIAMS, W. D. (1966). Conductivity and the concentration of total dissolved solids in Australian lakes. Aust. J. Mar. Freshwat. Res. 17: 169-176.
  
- WILLIAMS, W.D. (1981). The limnology of saline lakes in Western Victoria: a review of some recent studies. Hydrobiologia, 82: 233-259.

- WILLIAMS, W.D. (1985). Biotic adaptations in temporary lentic waters with special reference to those in semiarid and arid regions. Hydrobiologia, 125: 85-110.
- WINCHESTER, B.H. (1987). Inundation characteristics of wet Prairie and Marsh Wetlands in Southwestern Florida. En: Wetland hydrology. Proc Nat. Wetland Symposium. Chicago.
- WINTER, T.C. (1976). Numerical simulation analysis of the interaction of lakes and groundwater. US. Geol. Surv. Prof. Paper. 1001: 1-45.
- WINTER, T.C. (1977). The role of groundwater in lake-water balances. Proc. Lake management conference. Inst. of water resources. Univ. Connecticut 6: 5-29.
- WINTER, T.C. (1978). Numerical simulation of Steady State three-dimensional groundwater flow near lakes. Water Resources Research, 14(2): 245-254.
- WINTER, T.C. (1981a). Effects of water table configuration on seepage through lakebeds. Limnol Oceanogr., 26: 925-934.
- WINTER, T.C. (1981b) Uncertainties in estimating the water balances of lakes. Water Resources Bull., 17: 82-115.
- WINTER, T.C. (1983). The interaction of lakes with variably saturated porous media. Water Resources Research, 19(5): 1203-1218.

- WINTER, T.C. & CARR, M.R. (1980). Hydrologic setting of wetlands in the Cottonwood Lake area, Stutsman County, North Dakota. US Geol. Survey Water Resour. Invest.: 88-99.
  
- WINTER, T.C.; LABAUGH, J.W. & ROSENBERRY, D.U. (1988). The desing and use of a hidraulic potentiomanometer for direct measurement of differences in hidraulic head between grounwater and surface water. Limnol, Oceanogr., 33 (5): 1209-1214.
  
- WINTER, T.C. & WOO, M. (1988). Hydrology of lakes and wetlands. En: M.E. Moss; M.G. Wolman & H.C. Riggs (eds). Surface water hydrology. Boulden Colorado Geological Society of America. The Geology of North America.
  
- WOOD, R.B. & TALLING, J.F. (1988). Chemical and algal relationships in a salinity series of Ethiopian inland waters. Hydrobiologia, 158: 29-67.
  
- ZEKTZER, I.S. (1973a). Studying the role of groundwater flow in water and salt balances of lakes. Hydrology of Lakes, Helsinki Symposium. IAHS Publ. 109 pp.
  
- ZEKTZER, I.S. (1973b). On the ground-water discharge to the Baltic Sea and methods for stimating it. Nordic Hydrology, 4: 105-118.
  
- ZIMMERMAN, J.H. (1987). A Multi-Purpose wetland characterization Procedure, Featuring the Hydroperiod. En: Kusler & Brooks (ed). Wetland Hydrology. Proc. Nat. Wetland Symposium. Chicago: 31-48.

- ZIMMERMAN, A.P.; NOBLE, K.M.; GATES, M.A. & PALOHEIMO, J.E. (1983). Physicochemical typologies of South-Central Ontario Lakes. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 40: 1788-1803.



## 10. APENDICES

APENDICE 3.1. Situación geográfica y otras características físicas de los pozos instalados en el acuífero de Madrid y empleados para este estudio. (Datos extraídos de Martínez Alfaro, 1977; Rebollo,1977; Sastre,1978; Fernandez Uría, 1984; Rubio, 1984)

N.º POZO	CUENCA HIDROGRAFICA	TOPONIMIA	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD (m)	PROFUNDIDAD OBRA (m)	FILTROS (m)	NIVEL FREATICO (m)	BASE ACUIFERO (m)	DISTANCIA AFLORA- MIENTO CRISTALINO (km)	DISTANCIA AFLORA- MIENTO FAC. TRANSICION (km)
1	Jarama	Essex	3º36'13"	40º42'18"	675	124	609	672	2600	1.2	16.4
2	Jarama	Valdeolivias	3º36'12"	40º41'24"	708	180	618	643	2600	0.7	17.2
3	Jarama		3º35'50"	40º39'17"	620	150	517			3.2	15.0
4	Jarama	Ciudadcampo	3º33'40"	40º37'26"	630	265	492	589		3.2	11.0
5	Jarama	El Soto	3º33'02"	40º36'47"	600	113	542	599	2000	8.4	9.6
6	Jarama	Comylsa	3º35'32"	40º39'56"	630	117	562	622	2350	3.0	15.0
7	Jarama	Punta Galea	3º35'31"	40º38'56"	615	212	515	555	2150	6.5	11.8
8	Jarama	Acceso	3º34'25"	40º37'40"	610	290	465			6.5	11.8
9	Jarama	Mte. Levante	3º34'25"	40º37'47"	640	290	495	582	2150	6.5	11.8
10	Jarama	Depósito	3º34'17"	40º38'10"	660	300	468	586	2150	6.5	11.8
11	Jarama	El Monte	3º34'18"	40º37'38"	610	284	468			6.5	11.8
12	Jarama	Concepción Jeronima	3º41'50"	40º33'10"	740	264	500	622	2350	9.0	13.0
13	Jarama	Arturo Fierro	3º37'50"	40º30'51"	718	245	562	642	2050	16.3	5.8
14	Jarama	Los Sauces	3º38'30"	40º31'07"	690	110	630	659	2100	15.5	6.5
15	Jarama	Alber	3º39'22"	40º52'03"	670	127	601			13.7	8.0
16	Jarama	Pascual	3º38'16"	40º32'15"	660	177	571	633	2050	14.0	7.2
17	Jarama	Bárbudo	3º36'55"	40º32'57"	670	64	613	640	2050	14.0	6.0
18	Jarama	Bonet	3º37'04"	40º33'20"	658	170	560	618	2100	13.0	7.0
19	Jarama	Club Golf	3º37'03"	40º31'16"	675	236	557	640	2000	16.0	5.4
20	Jarama	Abº Ajalvir-1	3º33'08"	40º32'04"	575	114	518	575	2000	18.0	0.6
21	Jarama	Los Alcotanes	3º34'30"	40º34'26"	600	144	509	593	1950	13.0	5.0

APENDICE 3.1. (continuación)

N.º POZO	CUENCA HIDROGRAFICA	TOPONIMIA	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD (m)	PROFUNDIDAD OBRA (m)	FILTROS (m)	NIVEL FREATICO (m)	BASE ACUIFERO (m)	DISTANCIA AFLORA- MIENTO CRISTALINO (km)	DISTANCIA AFLORA- MIENTO FAC. TRANSICION (km)
22	Jarama	Lab. Reunidos	3°34'04"	40°34'40"	600	242	455	600	1900	12.0	5.5
23	Jarama	Cetme	3°32'40"	40°31'16"	590	100					
24	Jarama	Igme	3°34'30"	40°29'33"	610	305	480	610	1950	21.0	0.8
25	Jarama	Ppo. Barajas	3°33'56"	40°29'12"	590	155	483	590			
26	Manzanares	Mohamed Ficali	3°51'34"	40°31'15"	702	230	577	660	3200	5.6	16.3
27	Manzanares	Sgop. Pozo Pardo	3°47'22"	40°32'00"	615	62	578	615	3100	8.0	13.2
28	Manzanares	Piez corto Pardo	3°47'22"	40°32'00"	615	51	582	615	3100	8.0	13.2
29	Manzanares	FPD-1	3°44'40"	40°31'02"	726	441	506	611	3050	11.0	12.0
30	Manzanares	FA-3	3°43'54"	40°30'37"	703	431	442	616	3000	12.0	11.0
31	Manzanares	FE-1	3°41'58"	40°32'04"	725	505	473	606	2400	10.8	12.3
32	Manzanares	FPI-2	3°42'40"	40°31'53"	727	460	497	624	2650	11.0	12.8
33	Manzanares	Urb. Veracruz	3°51'35"	40°29'02"	720	141	635	650		10.0	13.2
34	Manzanares	Mafre P-2	3°52'14"	40°27'04"	742	210	622			12.6	11.7
35	Manzanares	El Campito	3°51'25"	40°29'08"	720	80	657	675	3200	9.7	13.3
36	Manzanares	Ginés Navarro	3°51'55"	40°27'57"	740	240	546			11.5	12.6
37	Manzanares	Interland 1	3°51'33"	40°28'14"	740	200	614			11.0	12.7
38	Manzanares	CTNE Pozuelo	3°49'12"	40°26'26"	680	175	577	651	3200	15.3	8.0
39	Manzanares	Misioneros I. Concep.	3°48'57"	40°25'59"	680	140	599	646	3200	16.4	7.7
40	Manzanares	Monteclaro 1	3°50'48"	40°26'42"	710	148	622	670	3200	13.0	11.0
41	Manzanares	Somontes	3°45'22"	40°29'45"	620	200	520	620	2950	12.2	8.9
42	Manzanares	INEF	3°44'01"	40°26'22"	605	250	480	598	2850	19.0	2.3
43	Manzanares	Tejar de Somontes	3°45'04"	40°28'41"	599	80	559	596	3000	14.0	6.9
44	Manzanares	Montero	3°41'16"	40°29'06"	730	297	685	670	2550	16.5	7.7
45	Manzanares	U. Complutense	3°43'12"	40°27'14"	640	171	555	510	2750	18.0	3.3



APENDICE 3.1. (continuación)

N. POZO	CUENCA HIDROGRAFICA	TOPONIMIA	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD (m)	PROFUNDIDAD OBRA (m)	FILTROS (m)	NIVEL FREATICO (m)	BASE ACUIFERO (m)	DISTANCIA AFLORA- MIENTO CRISTALINO (km)	DISTANCIA AFLORA- MIENTO FAC. TRANSICION (km)
46	Manzanares	Azca	3°41'40"	40°27'20"	700	161	627	666	2600	18.5	4.8
47	Manzanares	Hotel Montreal	3°44'33"	40°28'36"	620	120	560			14.8	6.3
48	Manzanares	Pisura Solagua	3°47'23"	40°20'27"	681	108	613	630	2600	24.6	4.3
49	Manzanares	Tecton S.A. P-1	3°47'33"	40°16'31"	672	101	603	643	1950	30.0	3.0
59	Manzanares	Fco. de Anta	3°47'34"	40°17'28"	660	71	629			28.5	3.0
51	Manzanares	Miguel Martinez	3°50'10"	40°15'30"	680	101	624			27.8	7.3
		Humanes									
52	Manzanares	Cerro del Lomo Ato P1	3°48'03"	40°17'02"	683	135	617	618	2050	28.0	3.7
53	Manzanares	Pozo nº 5	3°46'51"	40°14'50"	662	90	617	633	1850	31.8	3.0
54	Guatén	Alto de Griñon	3°51'22"	40°13'00"	674	131	612	613	1950	29.5	6.3
55	Guatén	Pozo nº 8	3°46'15"	40°14'00"	669	98	620	656	1850	33.6	2.5
56	Guatén	Matadero de Aves Merca	3°57'02"	40°06'02"	650	100	580	610	1900	34.5	5.0
57	Guatén	Homigones Toledo P-1	3°50'27"	40°08'52"	608	36	586			36.5	1.3
58	Guadarrama	Molino de la Hoz	3°56'03"	40°31'59"	628	160	555	595	3050	2.0	22.0
59	Guadarrama	Fco de Anta	3°54'49"	40°32'06"	700	200	556	609	3200	2.7	20.5
60	Guadarrama	La Chopera	3°54'31"	40°30'45"	700	280	547	633	3200	5.2	18.4
61	Guadarrama	S. Estanislao Kostka	3°56'16"	40°28'21"	610	200	510	604	3100	5.8	19.2
62	Guadarrama	Las Eras	4°00'06"	40°27'06"	652	161	567	627	3100	3.4	2.5
63	Guadarrama	Guadamonte	3°58'03"	40°25'06"	630	130	555			7.9	19.5
64	Guadarrama	Canto-Blanco	3°59'32"	40°26'30"	640	180	550			5.1	22.0
65	Guadarrama	Cenb Las Encinas	3°51'44"	40°25'08"	690	165	602	675	3150	19.3	11.1
66	Guadarrama	Alfonso Garcia Elvira	3°54'05"	40°29'33"	690	166	578	661	3200	6.6	17.0
67	Guadarrama	Valdecabañas 2	3°53'30"	40°26'33"	710	169	625	662	3200	10.3	14.6
68	Guadarrama	Felipe Gala	3°55'34"	40°28'36"	660	80	617			6.0	18.3

APENDICE 3.1. (continuación)

N. POZO	CUENCA HIDROGRAFICA	TOPONIMIA	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD (m)	PROFUNDIDAD OBRA (m)	FILTROS (m)	NIVEL FREATICO (m)	BASE ACUIFERO (m)	DISTANCIA AFLORA- MIENTO CRISTALINO (km)	DISTANCIA AFLORA- MIENTO FAC. TRANSICION (km)
69	Guadarrama	Sevilla La Nueva 2	4°01'36"	40°21'08"	675	236	539	595	2900	9.0	23.2
70	Guadarrama	Los Manantiales	4°00'42"	40°21'23"	660	215	541	603	2900	9.7	22.0
71	Guadarrama	Lab. Europa	3°59'50"	40°23'55"	650	150	565			7.3	21.3
72	Guadarrama	Ayto. Brunete 2	4°00'06"	40°24'58"	650	300	990			5.8	
73	Guadarrama	B. Española	3°54'12"	40°20'54"	650	120	576	594	3000	16.9	13.2
74	Guadarrama	Modesto Rodriguez	3°51'34"	40°21'40"	700	40	674	684	3000	18.9	9.8
75	Guadarrama	Urb. Campodon	3°52'05"	40°21'45"	690	162	592	670	3000	18.3	10.0
76	Guadarrama	Val de la Bolsa	3°54'02"	40°22'12"	660	250	507	595	3050	16.0	12.6
77	Guadarrama	Tomas Castaño S.A.	3°49'02"	40°20'13"	700	120	628	692	2700	22.7	7.0
78	Guadarrama	Navalcarnero 1	3°56'36"	40°18'07"	560	146	458	556	2550	17.6	16.2
79	Guadarrama	Jaime Mero	3°56'20"	40°15'57"	580	120	514	515	2150	20.6	15.3
80	Guadarrama	Bodega Veldeoro	4°04'31"	40°13'31"	660	126	580			17.0	21.8
81	Guadarrama	Fte. Valmojado	4°05'42"	40°12'28"	660	0	660	660	2350	17.3	21.0
82	Guadarrama	El Miquetal	3°59'53"	40°14'15"	610	187	495	542	2200	19.8	18.1
83	Guadarrama	Juan Grande	3°59'47"	40°13'56"	590	120	508	520	2200	22.0	16.2
84	Guadarrama	Batres S-2	3°56'25"	40°13'10"	560	144	458	560	2050	24.9	12.3
85	Guadarrama	Serranillos del Valle	3°52'57"	40°12'12"	640	100	590			29.3	7.0
86	Guadarrama	Casbega SA S-1	3°48'50"	40°18'08"	685	133	606	631	2100	26.0	5.1
87	Guadarrama	Valdemora	4°13'12"	40°02'52"	590	99	549	555	2200	23.8	3.0
88	Guadarrama	Fuensalida	4°12'13"	40°03'33"	583	120	511			24.0	4.5
89	Guadarrama	Fabrica Vivisa	4°06'34"	40°09'37"	625	102	575	617	2800	21.2	15.7
90	Guadarrama	Ayto. Camarena	4°06'43"	40°05'57"	576	90	525	570	2400	25.2	9.2
91	Guadarrama	Ayto. Ventas Retamosa	4°07'03"	40°09'30"	620	112	561	595	2800	20.4	15.5
92	Guadarrama	Chozas de Canales	4°02'48"	40°06'25"	570	100	520	568	2050	29.0	9.0

APENDICE 3.1. (continuación)

N.º POZO	CUENCA HIDROGRAFICA	TOPONIMIA	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD (m)	PROFUNDIDAD OBRA (m)	FILTROS (m)	NIVEL FREATICO (m)	BASE ACUIFERO (m)	DISTANCIA AFLORA- MIENTO CRISTALINO (km)	DISTANCIA AFLORA- MIENTO FAC. TRANSICION (km)
93	Guadarrama	Pero Moro	4°05'04"	40°05'14"	550	96	499	550	2050	28.0	7.7
94	Guadarrama	Toros Bravos	3°57'45"	40°09'58"	518	60	488	518	1900	29.0	9.8
95	Guadarrama	Ayto. Lominchar	3°58'26"	40°05'27"	650	180	545			34.3	5.2
96	Guadarrama	Crta. Fuensalida	4°08'16"	40°04'19"	556	60	526	556	2150	26.5	6.1
97	Guadarrama	Huerta Corbellas	3°59'50"	40°03'10"	560	204	445			36.3	1.5
98	Guadarrama	Ayto. Rielves	4°11'34"	39°57'52"	500	83	450	490			
99	Guadarrama	Fabrica Vivisa	4°06'36"	40°09'30"	625	60	595			21.5	14.9
100	Alberche	Quijorna	4°02'33"	40°25'20"	610	185	494	563	2900	2.2	26.3
101	Alberche	Cerro Alarcón	4°05'34"	40°25'09"	530	224	401	528	2550	0.1	29.7
102	Alberche	Las Treinta	4°08'09"	40°22'01"	500	101	450	496	2300	2.2	33.0
103	Alberche	Ayto. Villanue.Perales	4°06'42"	40°20'38"	580	125	509	554	2500	5.5	30.5
104	Alberche	Ayto. Villamantilla	4°07'28"	40°20'56"	582	175	472	520	2450	4.3	31.7
105	Alberche	A. Las Viñas	4°06'19"	40°22'26"	530	105	477	518	2550	3.0	30.7
106	Alberche	Valdisa	4°07'00"	40°20'40"	574	61	542	556	2450	4.8	31.2
107	Alberche	La Cepilla 3	4°06'33"	40°23'58"	526	284	385	526	2400	0.2	31.0
108	Alberche	El Salobral	4°08'17"	40°24'02"	550	120	491	550	2400	0.1	32.2
109	Alberche	Gasolin Villanueva	4°10'13"	40°22'57"	550	113	493			0.2	34.6
110	Alberche	Las Castañuelas	4°01'25"	40°21'37"	660	101	610	605	2950	8.5	23.1
111	Alberche	La Cepilla	4°03'20"	40°23'40"	565	140	490	554	2850	4.2	26.1
112	Alberche	Villa del Prado	4°17'28"	40°16'20"	500	65	463	488	2750	1.0	26.2
113	Alberche	Los Montero	4°12'17"	40°18'56"	520	87	476	445	2400	2.8	31.8
114	Alberche	Aldea del Fresno	4°12'08"	40°19'41"	460	0	460	460	2350	1.9	33.2
115	Alberche	A. Tordillos	4°24'38"	40°12'37"	456	100	406	456	2000	0.7	20.3
116	Alberche	Urb. Isla Escalona	4°23'39"	40°10'30"	450	165	342	430	2050	4.0	17.0

APENDICE 3.1. (continuación)

N. POZO	CUENCA HIDROGRAFICA	TOPONIMIA	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD (m)	PROFUNDIDAD OBRA (m)	FILTROS (m)	NIVEL FREATICO (m)	BASE ACUIFERO (m)	DISTANCIA AFLORA- MIENTO CRISTALINO (km)	DISTANCIA AFLORA- MIENTO FAC. TRANSICION (km)
117	Alberche	Hosp. Geriatrico	4°16'25"	40°14'50"	460	120	373	460	2750	3.9	23.2
118	Alberche	Fuentesauco	4°13'02"	40°11'46"	560	85	517	550	2650	13.6	17.2
119	Alberche	Fca. de Cartón	4°11'27"	40°14'56"	560	60	530	520	2450	9.2	24.7
120	Alberche	Malpuerta	4°06'52"	40°18'53"	520	100	456	510	2200	7.1	32.6
121	Alberche	Los Corrales	4°11'02"	40°19'33"	520	104	448	478	2300	3.0	33.5
122	Alberche	Pozo nuevo	4°06'44"	40°17'34"	540	197	429	523	2250	9.7	28.5
123	Alberche	Valdemantos	4°09'18"	40°18'40"	530	100	470	511	2200	5.0	32.6
124	Alberche	Valdepinos	4°04'28"	40°18'30"	430	121	497	554	2350	9.8	27.0
125	Alberche	Aguañil	4°05'50"	40°18'10"	518	150	478	546	2350	9.5	28.5
126	Alberche	Calypo-A	4°03'12"	40°15'02"	572	437	419	574	2350	16.0	22.3
127	Alberche	Aguañil	4°05'55"	40°18'06"	518	90	503	531	2350	9.7	28.5
128	Alberche	La Noria	4°02'23"	40°17'25"	515	66	582			13.6	23.5
129	Alberche	Ayto. Valmojado	4°05'44"	40°12'58"	658	200	523	579	2350	16.7	21.8
130	Alberche	San Fernando	4°35'37"	40°05'37"	420	70	385	420	1000	3.6	16.0
131	Alberche	Villacasan	4°34'38"	40°50'14"	462	120	360	399	550	8.9	17.0
132	Alberche	Ganadera del Centro	4°34'20"	40°00'53"	462	97	410	452	1000	11.5	10.2
133	Alberche	Guejigoso	4°27'12"	40°08'54"	424	44	402	424	1900	2.3	16.5
134	Alberche	Nava Loguilla	4°28'12"	40°09'40"	460	141	390			0.6	18.3
135	Alberche	Urb. Prima	4°23'35"	40°09'12"	444	110	389	444	2100	5.6	14.8
136	Alberche	Urb. Carrasquilla	4°24'03"	40°08'26"	460	102	406	451	2050	6.3	13.7
137	Alberche	El Mocho 2	4°21'18"	40°07'51"	520	100	458	491	2100	9.8	10.8
138	Alberche	San Antón	4°23'16"	40°08'12"	460	100	402			5.7	13.7
139	Alberche	Granja Vía	4°19'44"	40°06'40"	550	40	530	531	2150	13.0	8.1
140	Alberche	Finca la Canganza	4°21'01"	40°09'30"	470	136	389	451	2300	7.7	13.9

APENDICE 3.1. (continuación)

N. POZO	CUENCA HIDROGRAFICA	TOPONIMIA	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD (m)	PROFUNDIDAD OBRA (m)	FILTROS (m)	NIVEL FREATICO (m)	BASE ACUIFERO (m)	DISTANCIA AFLORA- MIENTO CRISTALINO (km)	DISTANCIA AFLORA- MIENTO FAC. TRANSICION (km)
141	Alberche	Ayto. Sta. Cruz de Retamar	4°14'47"	40°07'14"	586	70	526	574	2600	16.2	10.0
142	Alberche	Salamanquilla	4°29'18"	40°01'25"	452	90	410	452	1350	13.9	5.0
143	Alberche	Cerro Alberche 12	4°30'43"	40°03'40"	460	140	387	433	1250	10.0	9.0
144	Alberche	Navarrete	4°24'07"	40°03'20"	456	102	401	456	1750	13.3	5.8
145	Alberche	Valdeflores	4°23'51"	40°00'46"	505	73	468	496	1800	17.9	1.8
146	Alberche	Finca El Cerro	4°22'22"	40°04'11"	480	114	423			13.0	6.0
147	Alberche	Higuera P1	4°25'26"	40°03'22"	440	200	340	440	1850	13.0	6.3
148	Alberche	-----	4°20'02"	40°01'00"	530	92	484	520	1850	19.9	0.1
149	Alberche	Los Zumacales	4°20'58"	40°03'13"	470	90	425	470	2150	16.1	3.0
150	Alberche	Camino del Prado	4°14'44"	40°04'19"	560	12	554	549	2200	20.5	5.0
151	Alberche	Vulcanizados Milano	4°13'48"	40°04'46"	580	95	518	545	950	21.0	5.5
152	Alberche	Lucillos	4°36'35"	39°58'58"	482	130	412	419		12.8	12.0
153	Alberche	Barberitos	4°27'06"	39°57'48"	560	80	510	538	1350		
154	Alberche	Ayto. Erustes	4°29'48"	39°57'30"	540	70	505	525	2550	19.8	2.7
155	Alberche	Aldea del Fresno	4°13'54"	40°19'49"	460	10	455	475	2650	0.5	33.0
156	Alberche	Villa del Prado	4°14'24"	40°17'27"	450	7	446	448	2750	4.4	27.5
157	Alberche	Villa del Prado	4°17'14"	40°13'50"	440	5	437	439	350	4.7	21.5
158	Alberche	San Román	4°43'16"	40°01'18"	395	6	392	392	1050	4.8	22.0
159	Alberche	Los Cerralbos	4°35'01"	40°01'33"	435	0	435	435		9.7	11.3
160	Alberche	Talavera S-28	4°45'30"	39°58'26"	370	6	366		2200	4.8	24.7
161	Tajo	Ayto. Portillo	4°13'56"	40°03'22"	584	80	544	561	450	22.7	3.2
162	Tajo	Los Carvajales	4°42'17"	39°57'22"	378	50	354	374		9.6	20.0
163	Tajo	Manantial La Taza	4°23'38"	39°57'04"	540	0	540	540			

APENDICE 3.1. (continuación)

N.º POZO	CUENCA HIDROGRAFICA	TOPONIMIA	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD (m)	PROFUNDIDAD OBRA (m)	FILTROS (m)	NIVEL FREATICO (m)	BASE ACUIFERO (m)	DISTANCIA AFLORA- MIENTO CRISTALINO (km)	DISTANCIA AFLORA- MIENTO FAC. TRANSICION (km)
164	Tajo	Ayto. Carpio	4°27'29"	39°53'30"	480	90	435	420	475		
165	Tajo	Talavera Paloma	4°46'49"	39°58'15"	374	6	371	371	150	4.0	26.3
166	Tajo	Talav. Hontanillas	4°49'21"	39°59'26"	384	7	380	382	150	0.7	30.3
167	Tajo	Talav. Las Liebres	4°50'40"	39°56'03"	358	7	354	305	425		
168	Tajo	Pueblanueva	4°42'30"	39°57'36"	376	5	373	372		8.5	21.0
169	Tajo	Entrambosríos	4°45'00"	39°58'18"	380	11				5.8	24.0
170	Tajo	Montearagón	4°38'54"	39°57'24"	381	7	377	375	600	13.1	15.4
171	Tajo	Finca Gotanilla	4°37'31"	39°55'43"	385	11	373	380	300	16.5	14.0

**APENDICE 3.2. Variables del medio físico del área de estudio utilizadas para detectar indicadores que caracterizan sectores ambientales homogéneos.**

CUADRICULA	T(m³/día) (1)	PEND (2)	DESN(m) (3)	DD (4)	PD(km) (5)	DCAU(km) (6)	ALT(m) (7)	Q1(mm) (8)	Q2(mm) (9)	Q3(mm) (10)	Q4(mm) (11)	Q12(mm) (12)	PROF(m) (13)	COND(µS/cm) (14)
A01	10	3	42	39	11	2	400	79	66	39	0	4	4	1259
A02	6	5	102	99	17	2	430	103	61	76	10	86	3	1377
A03	6	6	110	93	32	4	460	84	36	34	0	0	1	802
A04	6	5	170	71	27	6	530	84	36	34	0	0	1	715
A05	6	7	175	67	28	4	520	48	65	42	1	1	1	575
A06	6	6	163	84	24	5	530	48	65	42	1	1	1.5	328
A07	6	5	162	65	17	3	520	64	65	38	0	16	2.5	411
A08	6	9	30	60	13	0	480	64	65	38	0	16	3.5	301
A09	6	7	222	67	28	10	596	14	42	14	0	0	21	607
A10	76	6	147	67	25	8	640	14	42	14	0	0	30	512
A11	76	6	100	61	25	0	652	14	42	14	0	0	21	372
A12	76	4	73	51	26	4	660	58	58	38	13	14	48	334
A13	17	6	81	71	20	1	670	48	60	24	0	0	43	287
A14	17	8	52	58	14	6	680	48	60	24	0	0	99	306
A15	17	6	77	47	10	6	670	58	71	56	15	51	81	307
A16	17	7	119	46	10	1	680	8	29	17	1	0	66	332
B02	150	5	66	46	10	4	470	51	69	16	0	0	5	3072
B03	150	4	82	62	25	0	440	42	45	25	0	0	6	1436
B04	6	5	84	63	24	2	440	84	36	34	0	0	1	1145
B05	6	5	77	69	30	4	510	48	65	42	1	2	3.5	620
B06	6	6	144	69	25	2	530	64	65	38	0	16	15	456
B07	6	8	91	68	44	6	550	64	65	38	0	16	11	292
B08	76	6	54	95	18	10	600	40	57	31	0	0	41	250
B09	76	6	62	99	30	2	580	40	57	31	0	0	13	340
B10	76	5	66	64	33	3	630	14	42	14	0	0	65	408
B11	76	8	100	78	36	8	640	14	42	14	0	0	6	390
B12	17	5	60	88	8	0	710	39	30	27	0	0	39	317
B13	17	6	100	92	10	6	650	39	30	27	0	0	38	767
B14	17	4	80	12	8	4	720	44	52	27	9	0	98	541
B15	17	7	156	44	15	4	650	8	29	17	1	0	41	326
C02	6	5	100	26	5	8	520	2	50	16	0	0	6	912
C03	6	5	70	45	15	10	530	42	45	25	0	0	6	886
C04	6	4	47	23	13	11	500	42	45	25	0	0	4	1282
C05	6	3	43	45	14	10	520	15	50	20	0	0	6	525
C06	36	4	50	62	19	12	580	31	61	15	0	0	13	375
C07	76	4	48	49	20	14	630	31	61	15	0	0	11	325
C08	76	5	61	48	18	6	640	31	61	15	0	0	58	372
C09	76	8	69	97	31	0	640	40	57	31	0	0	85	261
C10	76	6	55	104	30	7	600	40	57	31	0	0	36	252
C11	76	6	105	44	18	7	650	35	44	17	13	0	26	241
C12	17	6	94	40	12	0	670	35	44	17	13	0	52	331
C13	5	6	66	31	5	8	630	0	9	14	0	0	66	1112
C14	17	3	22	7	3	19	680	0	20	22	0	0	35	499
D06	13	4	49	31	13	8	580	0	0	0	0	0	24	347
D07	76	4	71	47	11	2	590	0	0	0	0	0	4.5	301
D08	76	6	96	58	25	0	580	31	61	15	0	0	3	325
D09	76	7	74	61	27	4	610	23	38	18	0	0	1	344
D10	76	7	81	78	13	12	640	23	38	18	0	0	62	765
D11	17	6	50	46	17	7	670	17	40	13	9	0	39	888
D12	5	7	80	18	2	6	640	17	40	13	9	0	32	853
E06	13	5	78	19	3	6	530	19	41	25	0	0	1	469
E07	13	6	60	33	10	2	530	0	0	0	0	0	1	1197
E08	76	7	82	51	20	8	580	0	1	13	0	0	3	1271
E09	76	6	80	48	14	10	610	23	38	18	0	0	41	830
E10	13	6	70	35	13	6	640	7	34	13	0	0	38	774

- (1) Transmisividad
- (2) Pendiente del terreno
- (3) Desnivel del terreno
- (4) Densidad de drenaje
- (5) Frecuencia de drenaje
- (6) Distancia al cauce-principal más cercano
- (7) Altitud
- (8) Exceso hídrico en enero
- (9) Exceso hídrico en febrero
- (10) Exceso hídrico en marzo
- (11) Exceso hídrico en abril
- (12) Exceso hídrico en diciembre
- (13) Profundidad del nivel freático
- (14) Mineralización del agua subterránea

APENDICE 5.1. Medidas de parámetros morfométricos y fisiográficos realizados en las formaciones palustres del acuífero de Madrid.

FORMACION PALUSTRE	ALT (m) (1)	DR (Km) (2)	DCH (Km) (3)	PERM (mes) (4)	SUP (ha) (5)	ANCH (m) (6)	LONG (m) (7)	PERI (m) (8)	PROF (m) (9)	DC (10)	ANCH/LONG (11)	SUP/PROF (m) (12)
Entrambosríos	376	0.05	1.5	-	0.38	-	-	-	-	-	-	-
Lag. de las Torres(*)	380	0.4	2.5	6	0.20	43.3	59.62	184.28	0.15	1.16	0.72	13333.0
Man. de la Mata(*)	400	1.0	3.0	6	0.16	29.9	71.82	311.24	0.20	2.19	0.41	8000.0
Charca Seca (a)	440	1.5	0.5	-	0.06	-	-	-	-	-	-	-
Charca Seca (b) (*)	440	0.8	0.5	4	0.01	8.4	14.66	36.76	0.30	1.03	0.57	333.0
Charca Seca (c)	440	1.2	0.6	-	0.06	-	-	-	-	-	-	-
Los Baldíos(*)	445	1.0	0.5	4	0.02	10.5	19.46	49.9	0.20	1.05	0.54	900.0
Retamalón(*)	445	2.0	0.6	5	0.95	79.8	155.29	446.16	0.60	1.29	0.51	15833.0
Lag. Delgada(*)	440	1.2	0.4	5	0.40	63.8	79.82	239.6	0.80	1.06	0.79	5000.0
El Pocito	460	2.0	4.5	-	0.65	-	-	-	-	-	-	-
Ojo del Bravo(*)	460	0.6	2.0	8	0.002	5.2	6.30	18.0	1.22	1.01	0.82	20.8
L. Fuente del Valle(*)	460	1.5	3.2	8	0.025	11.5	24.08	80.9	0.30	1.49	0.47	833.0
Sanchibuey(*)	465	1.5	2.8	8	0.14	2.1	337.90	718.08	0.30	5.41	0.006	4666.0
Tablas Sta. Olalla	470	2.0	3.0	-	0.23	-	-	-	-	-	-	-
Ojos de Maqueda	480	0.4	3.5	-	0.062	-	-	-	-	-	-	-
Miragros	485	1.1	0.6	-	0.75	-	-	-	-	-	-	-
Juncos	480	0.5	1.0	-	0.49	-	-	-	-	-	-	-
Llano Tablas	500	1.8	1.5	-	0.23	-	-	-	-	-	-	-
L. de la Portera	510	1.9	1.5	-	0.312	-	-	-	-	-	-	-
Navazarza(*)	475	1.2	0.8	7	0.009	8.5	14.43	37.7	0.75	1.09	0.59	126.6
Grullera	580	1.9	1.8	-	0.29	-	-	-	-	-	-	-
Regue. Muttonillas	595	2.2	1.8	-	0.29	-	-	-	-	-	-	-
Fuente Esquina	610	0.3	1.5	-	0.16	-	-	-	-	-	-	-
L. de la Cañada	640	3.0	0.5	-	0.26	-	-	-	-	-	-	-
Buenavista(*)	640	3.0	0.5	5	0.25	40.6	79.06	195.98	0.75	1.10	0.51	3333.0
Soto Aº Berciana	480	0.3	3.5	-	0.13	-	-	-	-	-	-	-
Balsa Mercadas	590	1.0	3.5	-	0.12	-	-	-	-	-	-	-
Aº Aguajil(*)	570	0.5	3.0	7	0.012	9.1	17.01	41.6	1.25	1.07	0.53	96.0
Lag. Grande	650	4.6	0.5	-	0.25	-	-	-	-	-	-	-
Lag. Chica (*)	640	3.6	0.2	5	0.026	17.2	19.44	60	0.70	1.04	0.88	371.4
Ch. Casarrubios	600	0.5	1.0	-	0.40	-	-	-	-	-	-	-
Ch. El Alamo	610	0.5	2.2	-	0.28	-	-	-	-	-	-	-
Balsa de los Pinos	640	1.1	2.0	-	0.09	-	-	-	-	-	-	-
L. Grande Navalpuelco	540	0.5	2.0	-	0.31	-	-	-	-	-	-	-



APENDICE 5.1. (Continuación)

FORMACION PALUSTRE	ALT (m) (1)	DR (Km) (2)	DCH (Km) (3)	PERM (mes) (4)	SUP (ha) (5)	ANCH (m) (6)	LONG (m) (7)	PERI (m) (8)	PROF (m) (9)	DC (10)	ANCH/LONG (11)	SUP/PROF (m) (12)
Ch. Sevilla la Nueva	660	4.5	4.0	-	0.12	-	-	-	-	-	-	-
L. Villanueva Cañada	640	1.2	2.0	-	0.25	-	-	-	-	-	-	-
Lag. Antigua(*)	680	2.5	0.8	4	0.30	7.1	23.35	116.20	1.00	1.89	0.30	10000.0
Lag. Cubas	540	0.8	0.8	-	0.125	-	-	-	-	-	-	-
Cerro del Rayo(*)	655	3.2	0.5	5	0.01	7.1	16.05	42.63	0.70	1.20	0.44	142.8
L. Sancha Barca	659	4.0	0.6	-	0.25	-	-	-	-	-	-	-
La Horca	650	3.4	1.0	-	0.337	-	-	-	-	-	-	-
L. Humanes	690	2.5	1.0	-	0.282	-	-	-	-	-	-	-
L. Fregaceros	680	1.5	1.1	-	0.312	-	-	-	-	-	-	-
Balsa Fuenlabrada	660	2.8	1.2	-	0.125	-	-	-	-	-	-	-
Balsa Llanos (S)	680	0.8	1.0	-	3.0	-	-	-	-	-	-	-
Balsa Llanos (N) (*)	685	1.0	1.0	4	0.20	47.5	60.37	268.3	0.10	1.69	0.78	20000.0
L. Polvoranca	670	0.05	0.5	-	0.25	-	-	-	-	-	-	-
L. José Herrero(*)	680	0.2	0.3	4	0.20	46.5	54.43	159.02	0.15	1.00	0.85	13333.0
L. Mari Pascuala	680	0.05	0.5	-	5.43	-	-	-	-	-	-	-
Balsilla Leganés	680	1.3	1.0	-	0.25	-	-	-	-	-	-	-
Balsa de Alcorcón	680	0.5	2.0	-	0.19	-	-	-	-	-	-	-
L. Navalcarnero	650	2.0	2.1	-	0.25	-	-	-	-	-	-	-
L. del Aguila.	520	2.6	2.0	-	0.28	-	-	-	-	-	-	-

(\*) Lagunas conservadas.

- (1) Altitud
- (2) Distancia mínima al cauce más cercano
- (3) Distancia a la charca más cercana
- (4) Permanencia del agua
- (5) Superficie
- (6) Anchura máxima
- (7) Longitud máxima
- (8) Perímetro
- (9) Profundidad potencial
- (10) Desarrollo de costa o índice de forma
- (11) Anchura máxima/Longitud máxima
- (12) Superficie/Profundidad.

APENDICE 5.2. Resultados de los análisis físico-químicos de muestras de agua recogidas en las formaciones palustres del acuífero de Madrid durante 1987. Se hace referencia también al porcentaje de error analítico detectado en cada una de las muestras.

\* MUESTREO 1: FEBRERO-ABRIL 1987

FORMACION PALUSTRE	CONDUCTIV. (µS/cm)	SALINIDAD (g/l)	ALCAL. TOTAL (meq/l)	Cl- (meq/l)	SO4= (meq/l)	Ca++ (meq/l)	Mg++ (meq/l)	Na+ (meq/l)	K+ (meq/l)	pH	O2 DISUELTO (mg/l)
Manant. Mata	6980	4.61	2.42	47.6	27.15	3.3	13.2	54.00	0.158	7.0	8.5
Las Torres 1	12000	8.58	5.62	92.9	42.36	4.5	44.8	98.50	0.430	8.0	28.0
Las Torres 2	32000	24.20	5.84	277.2	129.60	14.1	82.9	280.00	1.556	8.6	5.2
Las Torres 3	8810	6.96	1.82	57.9	49.50	6.8	42.6	76.50	0.294	7.4	14.0
Charca Seca	33	0.05	0.48	0.2	0.11	0.3	0.2	0.14	0.035	5.0	3.6
Los Baldíos	84	0.12	1.40	0.1	0.21	0.3	1.2	0.07	0.080	5.0	3.0
Retamalón	96	0.06	0.48	0.2	0.10	0.3	0.2	0.10	0.240	6.0	10.2
Lag. Delgada	88	0.08	0.74	0.1	0.22	0.3	0.2	0.14	0.320	6.0	10.2
Ojo del Bravo	823	0.68	6.30	2.4	0.95	2.3	3.3	3.45	0.030	7.8	15.2
Fuente Valle	1294	1.24	10.54	4.7	2.15	5.2	4.1	6.59	0.720	7.8	11.8
Sanchibuey 1	942	0.94	8.72	2.3	1.49	1.5	1.7	7.74	0.079	7.8	10.0
Navazarza	284	0.24	2.40	0.7	0.26	1.2	0.5	1.27	0.084	6.5	13.0
Buenavista	153	0.14	1.36	0.2	0.27	0.8	0.5	0.12	0.470	6.5	10.2
Aguañil 1	325	0.31	3.28	0.6	0.31	2.1	0.6	0.93	0.180	6.5	3.6
Aguañil 2	316	0.29	3.34	0.3	0.20	2.1	0.6	0.90	0.087	6.5	0.6
Lag. Chica	104	0.09	0.60	0.1	0.56	0.6	0.3	0.09	0.180	5.5	9.6
Lag. Antigua	181	0.14	1.22	0.2	0.52	0.7	0.8	0.30	0.179	6.5	8.4
Cerro del Rayo	511	0.42	3.94	0.4	0.98	4.5	1.0	0.26	0.517	7.0	0.8
Balsa Llanos (N)	237	0.19	1.84	0.3	0.37	1.6	0.5	0.23	0.180	7.0	10.4
L. José Herrero	261	0.25	2.72	0.4	0.21	1.8	0.8	0.09	0.410	6.5	12.2

APENDICE 5.2. (Continuación)

\*MUESTREO 1: FEBRERO-ABRIL 1987 (Cont..)

FORMACION PALUSTRE	NO2= (µg-at/l)	NO3= (µg-at/l)	NH4+ (µg-at/l)	PO4= (µg-at/l)	SiO2 (mg/l)	CLOROFILA a (mg/m3)	TURBIEDAD (UN)	SESTON TOT. (mg/l)	TEMPERAT. (°C)	ERROR (%)
Manant. Mata	0.009	24.07	0.09	0.18	8.79	6.67	27.5	36	7.0	4.41
Las Torres 1	0.070	6.50	1.21	0.07	14.80	22.50	13.5	48	13.0	2.57
Las Torres 2	0.013	15.29	0.78	4.60	9.22	10.77	26.5	107	20.5	4.30
Las Torres 3	0.011	8.26	1.14	0.34	12.65	15.67	8.5	52	15.0	7.20
Charca Seca	0.014	13.53	0.78	0.15	10.51	9.55	3.1	3	13.0	7.84
Los Baldíos	0.009	2.11	0.68	0.20	6.85	13.76	3.5	11	13.0	1.48
Retamalón	0.059	19.68	0.33	2.11	16.52	8.09	580.0	53	16.0	3.70
Lag. Delgada	0.012	28.46	0.47	0.62	5.78	6.85	76.0	59	19.0	4.95
Ojo del Bravo	0.004	5.62	0.71	0.01	26.41	14.47	2.3	5	17.0	3.04
Fuente Valle	0.006	6.50	1.49	4.59	51.34	13.63	9.0	14	17.0	2.47
Sanchibuey 1	0.017	6.50	0.32	0.18	4.49	2.17	61.0	32	17.0	6.33
Navazarza	0.011	15.29	1.35	1.05	29.85	29.06	5.1	25	19.5	4.77
Buenavista	0.028	173.30	1.21	5.45	17.38	10.42	960.0	629	12.0	1.66
Aguajil 1	0.011	24.07	0.36	3.52	42.75	16.00	13.0	31	15.0	4.75
Aguajil 2	0.015	6.50	0.42	4.19	38.45	6.18	5.2	2	15.0	2.12
Lag. Chica	0.104	182.15	2.85	1.49	11.37	7.14	1125.0	35	10.0	3.70
Lag. Antigua	0.068	22.31	2.42	4.02	16.95	15.10	2000.0	1413	9.5	0.99
Cerro del Rayo	0.038	164.58	1.85	3.49	15.67	48.99	43.0	54	17.0	8.19
Balsa Llanos (N)	0.025	103.11	2.49	1.46	10.92	115.22	1660.0	995	14.0	0.00
L. José Herrero	0.007	2.99	0.65	5.09	11.34	10.42	15.5	24	21.0	3.57

APENDICE 5.2. (Continuación)

\*MUESTREO 2: MAYO 1987

FORMACION PALUSTRE	CONDUCTIV. (µS/cm)	SAJINIDAD (g/l)	ALCAL TOTAL (meq/l)	Cl- (meq/l)	SO4= (meq/l)	Ca++ (meq/l)	Mg++ (meq/l)	Na+ (meq/l)	K+ (meq/l)	pH	02 DISUELTO (mg/l)
Charca Seca	287	0.20	0.90	0.7	1.34	0.7	0.9	0.62	0.680	6.0	15.6
Los Baldíos	274	0.22	2.13	0.6	0.31	0.5	1.2	0.40	0.759	6.5	15.6
Retamalón	96	0.11	0.61	0.2	0.71	0.6	0.4	0.23	0.230	6.5	10.7
Lag. Delgada	69	0.06	0.57	0.1	0.10	0.2	0.2	0.07	0.164	6.0	5.4
Ojo del Bravo	874	0.67	6.72	2.1	0.67	2.7	3.1	3.03	0.035	7.5	11.9
Sanchibuey 1	1170	1.03	10.30	2.3	0.72	3.5	2.0	8.20	0.164	7.9	2.5
Sanchibuey 2	2820	2.16	17.08	11.2	0.52	4.9	4.3	23.79	0.133	8.0	5.1
Navazarza	279	0.24	2.26	0.7	0.46	1.3	0.5	1.27	0.084	6.0	5.1
Buenavista	208	0.20	1.67	0.3	0.60	1.2	0.6	0.18	0.654	6.5	5.2
Aguañil 1	362	0.32	3.28	0.6	0.41	2.6	0.7	0.93	0.128	6.5	9.0
Aguañil 2	337	0.31	3.30	0.5	0.41	2.1	0.7	0.94	0.072	6.5	2.7
Lag. Chica	94	0.11	0.67	0.5	0.50	0.9	0.4	0.10	0.187	6.0	5.6
Cerro del Rayo	645	0.47	4.97	0.4	0.63	4.3	1.0	0.39	0.500	7.0	14.5
Balsa Llanos (N)	145	0.13	1.09	0.2	0.62	0.9	0.5	0.20	0.151	7.0	6.4



APENDICE 5.4. Resultados de los análisis realizados a partir de cuatro muestras de agua de lluvia recolectada en la Universidad Autónoma de Madrid y de dos charcos de lluvia efímeros en las proximidades de Talavera de la Reina.

	CONDUCT ( $\mu\text{S}/\text{CM}$ )	SALINID ( $\text{g}/\text{l}$ )	ALCALIN ( $\text{meq}/\text{l}$ )	$\text{Cl}^-$ ( $\text{meq}/\text{l}$ )	$\text{SO}_4^{=}$ ( $\text{meq}/\text{l}$ )	$\text{Ca}^{++}$ ( $\text{meq}/\text{l}$ )	$\text{Mg}^{++}$ ( $\text{meq}/\text{l}$ )	$\text{Na}^+$ ( $\text{meq}/\text{l}$ )	$\text{K}^+$ ( $\text{meq}/\text{l}$ )	pH	$\text{SiO}_2$ ( $\text{mg}/\text{l}$ )	ERROR (%)
AGUA DE LLUVIA Enero/88	42	0.031	0.21	0.08	0.20	0.42	0.032	0.032	0.01	5	0.53	0.4
AGUA DE LLUVIA Abril/88	52.3	0.037	0.32	0.14	0.08	0.36	0.020	0.04	0.02	6.5	1.45	10.2
AGUA DE LLUVIA Octubre/88	60	0.12	0.28	0.53	0.11	0.36	0.22	0.34	0.02	6.5	1.31	1.0
AGUA DE LLUVIA Noviembre/88	82.6	0.18	0.14	0.25	0.36	0.45	0.03	0.26	0.016	6.5	1.2	0.3
CHARCO SOBRE RANA	110	0.10	0.68	0.3	0.51	0.5	0.4	0.29	0.14	6	6.64	5.6
CHARCO SOBRE ARENAS	132	0.12	1.06	0.3	0.31	0.7	0.4	0.24	0.17	6.5	3.20	5.0

APENDICE 5.5. Matriz de ausencia-presencia de algunos grupos de organismos encontrados en las formaciones palustres del acuífero de Madrid.

CODIGOS UTILIZADOS EN LOS NOMBRES DE LOS HUMEDALES

Manatíal de la Mata MA  
 Laguna de las Torres TO  
 Charca Seca CS  
 Baldíos BA  
 Retamalón RE  
 Laguna Delgada DE  
 Ojo del Bravo OB  
 Fuente del Valle FV  
 Sanchibuey SA  
 Navazarza NA  
 Aguajil AG  
 Buenavista BU  
 Laguna Chica CH  
 Laguna Antigua AN  
 Cerro del Rayo CR  
 Balsa de los Llanos LL  
 Laguna de Jose Herrero JH

Taxón	Código	MA	TO	CS	BA	RE	Localidades							
							DE	OB	FV	SA	NA	AG	BU	CH
CL. GASTEROPODA														
Lymnaea peregra (Miller)	LYMPE								+					
L. truncatula (Miller)	LYMTR								+					
Planorbarius metidjensis (Forbes)	PLANE									+				





APENDICE 5.5 (Continuación)

Taxón	Código	MA	TO	CS	BA	RE	Localidades													
							DE	OB	FV	SA	NA	AG	BU	CH	AN	CR	LL	JH		
<i>Leydigia acanthocercoides</i> Fischer	LEVAC																			
<i>Macrothrix hirsuticornis</i> Norman & Brady	MACHI						+													+
<i>Moina brachiata</i> Jurine	MOTBR						+													+
<i>Pleuroxus aduncus</i> Jurine	PLEAD																			
P. letourneuxi Richard	PLELE																			
<i>Simocephalus exspinosus</i> Koch	SIMEX																			
S. vetulus Müller	SIMVE																			
<i>Simocephalus</i> sp.	SIM						+													
Subcl. Ostracoda	OST	+	+	+		+				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Subcl. Copepoda																				
<i>Acantocyclops</i> sp.	ACA																			
<i>Arctodiaptomus salinus</i> Daday	ARCSA		+																	
A. wierzejskii Richard	ARCWI	+																		
<i>Cletocamptus retrogressus</i> (Schmank)	CLERE		+																	
<i>Cyclops</i> sp.	CYC																			+
<i>Diaicyclops bicuspidatus</i> Claus	DIABI			+																
<i>Diaptomus cyaneus</i> Gurney	DIACY						+													+
<i>Hemidiaptomus roubani</i> Richard	HEMRO						+													+
<i>Megacyclops viridis</i> Jurine	MEGVI																			
<i>Metacyclops minutus</i> Claus	MEIMI			+		+														+
<i>Mixodiaptomus incrassatus</i> Sars	MIXIN	+			+	+	+													+
<i>Neolovenula alluandi</i> (Guerne & Richard)	NEOAL																			+
CL. INSECTA																				
O. Odonata																				
<i>Aeschna mixta</i> (Latreille)	AESMI																			+
<i>Ischnura pumilio</i> (Charpentier)	ISCPU																			+
<i>Lestes barbarus</i> (Fabricius)	LESBA					+														+





**APENDICE 6.1. Estimación de la evaporación (E) y evapotranspiración (ET) en valores medios para la estación meteorológica de Cuatro Vientos (Madrid). Medidas directas: (1) Evaporímetro tipo A. (2) Evaporímetro tipo Piché. Cálculos semiempíricos: (3) Método de Penman (4) Método de Thornthwaite. .**

MESES	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C)	MEDIA DE HORAS DE INSOLACION/MES	HUMEDAD RELATIVA (%)	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	(1) E (mm)	(2) E (mm)	(3) E (mm)	(4) ET (mm)
OCT 87	12.5	3.55	79	3.32	2.4	3.4	1.4	4.2
NOV 87	7.5	5.32	80.5	2.57	1.4	2.9	0.5	1.8
DIC 87	7.9	2.43	93	2.92	1.3	1.1	0.2	1.8
ENE 88	7.4	3.65	86	3.67	1.2	2.4	0.5	1.7
FEB 88	7.2	6.82	72.2	3.12	2.0	3.9	1.2	1.8
MAR 88	10.8	8.24	56.5	3.15	3.8	6.1	2.8	3.6
ABR 88	11.8	6.43	74.5	2.52	3.4	4.2	2.8	4.5
MAY 88	15.1	7.67	71	2.07	3.8	4.7	3.8	7.0
JUN 88	17.8	7.34	68.5	2.07	4.7	5.3	4.3	9.2
JUL 88	23.6	11.73	51.2	2.25	7.5	8.9	6.3	13.5
AGO 88	23.6	11.53	41.5	2.42	3.0	11.7	5.8	12.6
SEP 88	21.6	8.85	46.2	2.85	5.6	9.0	4.3	10.1
OCT 88	15.1	6.45	71	2.70	3.7	4.4	1.8	5.3
NOV 88	10.1	4.77	81.2	2.17	1.1	2.1	0.5	2.5
DIC 88	6.0	2.90	90	2.97	0.7	2.7	0.2	0.9
ENE 89	6.1	3.10	76.2	1.57	1.1	2.1	0.4	1.1
FEB 89	8.2	5.52	74.7	4.20	1.6	3.4	1.4	1.9
MAR 89	11.8	7.08	60.2	4.20	3.0	4.8	3.2	3.7
ABR 89	10.3	6.86	69	6.90	3.5	4.8	3.9	3.3
MAY 89	17.9	8.35	56.2	3.15	4.9	6.1	5.1	8.9
JUN 89	25.2	10.89	38.2	3.50	6.4	8.5	7.6	16.1
JUL 89	26.7	11.78	39.7	4.60	8.1	12.5	8.6	17.4
AGO 89	24.5	10.65	41	3.87	7.8	12.2	7.1	14.2
SEP 89	19.2	7.34	55	3.15	4.7	6.5	3.8	8.6

APENDICE 6.2. Resultados de los análisis físico-químicos del seguimiento intensivo de cuatro lagunas y sus piezómetros próximos en el acuífero de Madrid.

FORMACION PALUSTRE	CONDUCTIV. ( $\mu$ S/cm)	SALINIDAD (g/l)	ALCAL. TOTAL (meq/l)	Cl- (meq/l)	SO4=	Ca++ (meq/l)	Mg++ (meq/l)	Na+ (meq/l)	K+ (meq/l)	pH	SiO2 (mg/l)	TEMPERAT. (°C)	ERROR (%)
N DE MUESTREO													
L. CHICA 1	47	0.07	0.44	0.19	0.19	0.34	0.20	0.04	0.25	6.0	6.10	10	5.8
L. CHICA 2	60	0.06	0.44	0.11	0.11	0.30	0.10	0.03	0.26	6.0	3.90	13	2.2
L. CHICA 3	76	0.09	0.61	0.19	0.39	0.58	0.14	0.07	0.31	5.5	6.05	11	3.9
L. CHICA 4	63	0.08	0.46	0.14	0.33	0.38	0.10	0.05	0.36	5.5	9.33	11	2.1
L. CHICA 5	70	0.08	0.55	0.14	0.35	0.40	0.10	0.04	0.31	6.0	2.46	17	10.0
L. CHICA 6	87	0.09	0.67	0.14	0.25	0.46	0.08	0.06	0.46	6.5	6.40	12	0.0
L. CHICA 7	95	0.09	0.40	0.14	0.56	0.60	0.12	0.08	0.36	6.5	9.31	18	2.6
L. CHICA 8	31	0.08	0.27	0.14	0.54	0.43	0.19	0.03	0.23	6.0	15.99	16	4.2
L. CHICA 9	56	0.08	0.50	0.14	0.41	0.44	0.36	0.03	0.35	6.5	6.36	17	5.8
L. CHICA 10	94	0.13	1.06	0.19	0.43	0.60	0.47	0.06	0.20	6.5	9.70	24	3.1
L. CHICA 11	145	0.21	1.68	0.20	0.40	0.90	0.40	0.08	0.50	6.5	6.50	22	9.4
L. CHICA 13	138	0.12	1.06	0.19	0.32	0.64	0.12	0.11	0.43	6.5	3.05	13	9.4
L. CHICA 14	177	0.15	1.38	0.16	0.31	1.02	0.06	0.13	0.33	6.5	7.40	6	9.1
L. CHICA 15	65	0.16	1.24	0.16	0.68	0.90	0.38	0.13	0.36	6.0	8.35	10	8.0
L. CHICA 16	118	0.13	0.70	0.22	0.77	0.68	0.48	0.13	0.24	6.5	10.37	7	4.9
L. CHICA 17	198	0.25	1.52	1.12	0.95	1.40	1.60	0.23	0.44	6.5	1.56	14	1.2
L. CHICA 19	239	0.20	1.18	0.78	0.67	1.40	0.40	0.40	0.60	6.0	8.39	28	3.7
PIEZ. CH 2	293	0.22	1.48	0.98	0.50	0.92	0.12	1.06	0.35	6.5	12.56	17	9.4
PIEZ. CH 8	387	0.58	3.68	2.25	1.58	2.08	1.92	1.66	1.26	7.5	49.88	16	4.1
PIEZ. CH 9	1928	0.82	1.80	2.53	4.74	1.80	2.10	1.73	4.19	7.0	132.39	18	3.9
PIEZ. CH 10	160	0.42	1.26	1.07	3.63	0.72	3.00	0.47	0.60	7.0	47.53	17	10.8

APENDICE 6.2. (Continuación).

FORMACION PALUSTRE N DE MUESTRO	CONDUCTIV. (µs/cm)	SALINIDAD (g/l)	ALCAL TOTAL (meq/l)	CL- (meq/l)	SO4= (meq/l)	Ca++ (meq/l)	Mg++ (meq/l)	Na+ (meq/l)	K+ (meq/l)	pH	SiO2 (mg/l)	TEMPERAT. (°C)	ERROR (%)
L. DELGADA 1	41	0.07	0.36	0.16	0.11	0.20	0.20	0.08	0.29	5.5	20.32	10	9.2
L. DELGADA 2	69	0.07	0.51	0.08	0.12	0.28	0.14	0.08	0.30	6.0	9.74	12	5.9
L. DELGADA 3	158	0.13	0.54	0.78	0.54	0.40	0.76	0.30	0.40	6.5	5.31	17	0.0
L. DELGADA 4	63	0.08	0.55	0.16	0.18	0.40	0.16	0.08	0.39	5.5	4.26	18	7.3
L. DELGADA 5	51	0.05	0.46	0.08	0.08	0.32	0.12	0.03	0.21	6.0	16.55	25	4.6
L. DELGADA 6	56	0.06	0.54	0.14	0.11	0.42	0.14	0.01	0.18	6.0	2.90	14	2.6
L. DELGADA 7	49	0.05	0.48	0.09	0.05	0.28	0.14	0.02	0.17	6.0	2.23	21	0.6
L. DELGADA 8	79	0.11	0.93	0.16	0.13	0.42	0.06	0.14	0.63	6.0	3.41	18	1.2
L. DELGADA 9	82	0.10	0.72	0.16	0.10	0.30	0.01	0.16	0.45	6.0	5.65	17	10.7
L. DELGADA 10	106	0.13	0.82	0.45	0.16	0.28	0.12	0.23	0.67	6.0	4.98	22	7.1
POZO DLP 1	2840	2.07	4.16	29.10	1.29	12.98	9.07	13.89	0.15	6.5	27.90	12	2.1
POZO DLP 2	4150	2.95	4.53	25.34	1.17	13.50	9.35	15.00	0.15	6.0	26.80	17	10.0
POZO DLP 3	1215	2.12	4.30	27.65	1.11	12.22	9.27	18.80	0.12	7.0	31.62	16	10.0
POZO DLP 4	3020	1.86	2.30	28.55	1.00	10.42	10.52	12.80	0.13	6.0	32.93	15	3.1
POZO DLP 5	3020	2.10	4.32	29.51	0.98	14.82	8.75	13.30	0.14	7.0	31.62	13	3.1
POZO DLP 6	2900	2.01	5.30	26.97	0.89	13.82	7.59	12.78	0.06	6.5	30.31	16	1.6
POZO DLP 7	3400	2.34	5.06	30.35	2.14	14.90	9.55	17.08	0.25	6.0	40.85	19	5.3
POZO DLP 8	2990	2.24	4.90	29.45	1.97	14.40	8.69	15.95	0.30	7.0	34.17	15	3.9
POZO DLP 9	3370	2.26	4.96	30.97	2.17	14.18	4.66	15.82	0.30	7.0	40.06	18	4.3
POZO DLP 10	2590	2.55	5.18	36.88	1.98	14.58	8.75	17.43	0.29	7.5	28.27	17	3.5
POZO DLP 11	3220	2.19	5.42	29.56	1.64	14.02	8.83	10.04	0.15	7.0	36.79	16	5.1

POZO DLP 12	3520	2.00	5.42	27.45	1.92	13.62	7.83	8.65	0.15	7.5	38.88	14	6.9
POZO DLP 13	3610	2.33	5.24	30.07	2.78	14.58	9.07	16.08	0.20	6.5	31.70	17	2.3
POZO DLP 14	3990	2.32	5.70	30.86	3.04	13.80	7.63	14.47	0.11	7.0	28.07.	10	4.7
POZO DLP 15	3750	2.70	6.04	39.42	3.46	13.02	11.64	14.65	0.13	7.0	83.66	11	10.7
POZO DLP 16	3700	2.45	6.14	31.53	3.15	13.90	9.03	17.17	0.13	7.0	26.33	13	0.7
POZO DLP 17	3120	2.19	1.60	31.25	4.02	13.02	10.04	16.04	0.13	7.0	43.57	12	3.1
POZO DLP 18	2980	2.41	6.10	28.72	3.52	12.42	19.68	13.78	0.11	6.0	41.75	19	9.1
POZO DLP 19	2890	2.19	6.26	27.87	3.14	12.90	3.53	14.30	0.09	7.0	41.75	18	9.5
POZO DLP 20	1535	2.17	7.10	25.06	4.52	7.54	8.30	14.43	0.10	7.0	49.03	15	9.4

APENDICE 6.2. (Continuación).

FORMACION PALUSTRE N DE MUESTREO	CONDUCTIV. (µs/cm)	SALINIDAD (g/l)	ALCAL. TOTAL (meq/l)	Cl <sup>-</sup> (meq/l)	SO4 <sup>=</sup> (meq/l)	Ca <sup>++</sup> (meq/l)	Mg <sup>++</sup> (meq/l)	Na <sup>+</sup> (meq/l)	K <sup>+</sup> (meq/l)	pH	SiO2 (mg/l)	TEMPERAT. (°C)	ERROR (%)
OJO BRAVO 1	791	0.77	7.18	1.80	0.73	2.88	2.57	3.55	0.08	6.0	28.70	10	3.3
OJO BRAVO 2	1030	0.76	7.31	1.77	0.87	2.72	2.85	3.77	0.06	7.0	30.40	12	2.8
OJO BRAVO 3	628	0.83	7.52	1.66	0.32	3.48	2.57	2.40	0.06	7.5	17.73	16	5.5
OJO BRAVO 4	592	0.49	4.41	1.77	0.41	3.08	0.47	2.65	0.06	6.5	15.59	16	2.5
OJO BRAVO 5	767	0.70	7.21	1.85	0.45	3.08	2.81	2.65	0.05	7.5	16.46	22	5.1
OJO BRAVO 6	836	0.82	8.85	1.85	0.41	4.92	2.51	2.46	0.02	6.5	17.12	14	5.7
OJO BRAVO 7	830	0.62	5.41	2.05	0.38	4.72	0.52	2.59	0.08	7.0	44.58	24	0.1
OJO BRAVO 8	850	0.83	7.89	2.14	0.68	5.13	2.53	2.93	0.07	7.0	41.64	19	0.2
OJO BRAVO 9	861	0.86	8.38	2.28	1.12	4.78	2.65	3.29	0.04	7.0	10.88	19	4.5
OJO BRAVO 10	891	0.91	8.94	2.39	0.78	4.78	1.94	3.43	0.03	7.0	50.48	23	8.6
OJO BRAVO 11	1145	1.17	8.34	3.46	3.92	6.69	3.57	3.95	0.37	7.5	70.10	23	3.8
OJO BRAVO 13	1248	0.88	6.96	2.78	1.03	5.59	2.91	3.36	0.13	7.0	75.73	15	5.4
OJO BRAVO 14	1181	0.74	6.40	2.95	0.94	3.10	3.11	3.39	0.06	7.0	19.82	9	3.1
OJO BRAVO 15	800	0.61	4.02	2.61	1.62	3.90	2.91	2.79	0.03	6.5	22.38	9	7.7
OJO BRAVO 16	994	0.94	8.80	2.87	1.47	5.21	2.87	3.16	0.06	7.0	16.46	12	7.5
OJO BRAVO 17	899	0.58	2.17	5.91	1.51	1.06	2.34	3.62	0.04	7.5	25.38	14	2.8
OJO BRAVO 18	967	0.56	1.75	4.22	1.65	1.60	3.01	4.24	0.05	6.0	58.13	22	7.7
OJO BRAVO 19	1027	0.79	1.90	4.50	1.03	3.10	1.06	4.13	0.14	6.5	61.77	23	6.3
PIEZ. OB 1	735	0.69	5.87	2.14	1.16	3.74	2.12	3.07	0.09	7.0	29.02	12	0.8
PIEZ. OB 2	1044	0.73	6.22	2.59	1.25	3.96	1.88	2.80	0.21	7.5	25.40	15	6.4
PIEZ. OB 3	808	1.17	6.14	8.72	3.08	4.00	5.14	7.13	0.14	7.5	28.99	19	4.4
PIEZ. OB 4	2250	1.52	2.30	14.84	5.25	3.88	6.82	11.60	0.13	6.0	32.93	15	4.7
PIEZ. OB 5	1226	1.03	5.79	6.75	2.41	4.88	4.69	5.82	0.11	8.0	33.37	15	1.8
PIEZ. OB 6	1624	1.22	6.73	8.74	3.69	3.62	5.24	7.47	0.16	7.0	17.40	18	7.5
PIEZ. OB 7	898	0.85	6.41	2.28	2.54	4.28	3.85	3.89	0.10	7.0	35.12	19	3.8
PIEZ. OB 8	930	0.82	7.21	2.08	1.46	4.56	2.77	3.13	0.24	7.0	34.33	18	0.2
PIEZ. OB 9	1008	0.95	9.52	2.36	0.30	4.40	3.21	3.20	0.63	7.0	53.81	18	3.1



PIEZ OB 10	2180	1.41	9.60	5.35	3.11	5.60	7.43	3.99	2.43	8.0	104.89	17	3.7
PIEZ OB 11	3060	1.45	11.50	5.29	1.14	3.20	2.65	11.17	1.55	7.0	95.31	19	1.7
PIEZ OB 12	3150	0.92	6.80	4.67	0.75	1.60	5.90	3.36	1.56	7.5	69.39	14	0.8
PIEZ OB 13	3180	1.52	7.06	12.86	2.52	5.65	6.10	9.60	0.82	7.5	73.99	13	0.5
PIEZ OB 14	1146	0.90	7.84	3.60	10.89	5.60	3.41	3.30	0.03	7.0	24.12	10	0.1
PIEZ OB 15	6100	3.88	7.40	43.49	9.61	7.61	17.47	44.78	0.22	7.0	24.24	11	7.3
PIEZ OB 16	1561	1.11	7.70	7.88	0.37	5.61	4.81	6.73	0.06	7.5	22.73	13	3.8
PIEZ OB 17	1567	1.37	2.06	21.68	1.31	4.80	8.23	8.30	0.11	7.5	23.90	12	7.7
PIEZ OB 18	1139	0.78	1.97	6.47	2.80	4.40	4.41	5.00	0.18	6.0	34.47	18	10.8
PIEZ OB 19	1047	0.88	7.25	3.94	0.16	5.53	3.49	4.65	0.14	7.0	34.47	18	9.7
PIEZ OB 20	938	1.20	9.48	3.90	0.91	5.94	1.47	3.46	0.13	7.5	39.93	15	7.2

APENDICE 6.2. (Continuación).

FORMACION PALUSTRE N DE MUESTREO	CONDUCTIV. ( $\mu$ s/cm)	SALINIDAD (g/l)	ALCAL TOTAL (meq/l)	Cl- (meq/l)	SO4= (meq/l)	Ca++ (meq/l)	Mg++ (meq/l)	Na+ (meq/l)	K+ (meq/l)	pH	SiO2 (mg/l)	TEMPERAT. (°C)	ERROR (%)
L. TORRES 1	20700	16.79	3.07	160.50	94.00	13.22	54.00	235.50	1.28	7.0	10.94	14	8.2
L. TORRES 2	33800	40.60	4.70	461.80	163.30	28.60	159.00	584.70	3.51	9.0	3.41	21	10.4
L. TORRES 3	68200	80.52	4.60	946.18	347.90	41.68	307.66	1091.30	7.69	9.0	4.69	23	5.4
L. TORRES 4	63350	87.37	2.80	1005.30	442.30	35.87	333.60	1095.60	8.43	10.0	7.97	18	0.8
L. TORRES 5	57900	61.52	3.57	737.80	248.40	32.26	244.80	839.10	7.28	9.0	4.56	26	6.3
L. TORRES 6	54400	53.06	4.05	678.60	217.80	32.06	226.90	634.70	7.17	9.0	6.01	20	0.0
L. TORRES 8	33300	29.20	3.16	380.20	111.91	22.44	140.17	339.10	4.76	9.0	14.02	32	1.1
L. TORRES 9	46200	39.84	3.30	566.00	115.00	34.26	64.06	534.80	6.64	9.0	9.31	20	3.3
L. TORRES 13	81100	72.01	9.74	951.80	285.00	39.67	337.79	821.70	4.05	8.5	9.01	20	1.7
L. TORRES 14	96200	95.58	5.56	1106.70	431.60	31.06	458.08	1256.50	4.46	9.5	3.66	6	6.2
L. TORRES 15	83000	88.67	5.22	985.60	508.90	35.47	346.42	1039.10	3.51	8.5	6.54	8	2.5
L. TORRES 16	55980	65.37	4.38	743.40	394.20	31.06	184.76	704.30	3.38	7.5	4.75	15	10.5
L. TORRES 17	82400	121.87	2.34	1351.70	611.20	60.12	481.98	1613.04	6.66	9.0	15.89	24	4.7
PIEZ TO 1	34500	38.60	2.68	549.24	115.90	26.65	143.10	475.60	3.89	7.0	22.76	12	2.5
PIEZ TO 2	48100	37.07	3.68	459.10	137.03	27.65	136.70	503.40	4.20	6.5	24.15	15	5.6
PIEZ TO 3	44600	34.44	3.26	464.60	130.08	36.87	147.80	382.60	4.64	8.0	3.34	19	2.2
PIEZ TO 4	39800	38.79	1.88	504.06	151.30	30.07	172.70	460.80	5.53	7.0	22.37	15	0.8
PIEZ TO 5	36600	34.76	2.41	459.00	128.32	32.06	170.70	402.20	4.89	7.5	19.75	20	1.6
PIEZ TO 6	38700	36.38	3.09	478.70	137.21	33.06	159.60	426.08	5.10	7.0	20.84	18	0.3
PIEZ TO 7	39900	36.27	3.09	470.30	147.00	34.06	172.70	406.08	5.38	8.0	9.19	19	0.1

PIEZ TO 8	36800	34.92	3.23	461.80	121.71	31.16	157.20	423.40	5.28	7.5	17.83	26	2.5
PIEZ TO 9	37700	34.69	3.34	450.60	134.98	31.26	151.40	406.08	5.17	7.5	15.99	18	0.4
PIEZ TO 10	42100	49.66	4.20	608.20	228.04	36.87	177.90	598.26	5.28	8.0	12.06	17	1.3
PIEZ TO 11	40400	30.31	3.14	523.78	89.78	37.27	181.50	343.90	3.25	8.0	24.83	27	4.3
PIEZ TO 12	34800	35.57	4.08	535.04	104.32	37.87	428.69	228.69	3.07	7.5	4.68	24	0.8
PIEZ TO 13	43600	31.48	2.90	484.30	60.00	33.26	159.40	370.40	2.50	7.0	25.67	17	1.6
PIEZ TO 14	50400	43.71	3.04	518.14	240.51	34.86	189.90	456.50	2.18	7.0	12.44	10	5.4
PIEZ TO 15	46000	34.94	3.88	487.17	93.43	13.80	201.40	426.08	2.26	7.5	19.89	11	6.0
PIEZ TO 16	45000	47.18	2.90	526.60	304.30	13.02	205.04	460.80	2.44	7.0	11.53	13	9.1
PIEZ TO 18	41500	51.07	0.86	560.40	290.96	35.27	191.58	608.69	3.05	6.0	24.54	19	0.8
PIEZ TO 19	39200	49.44	0.86	532.20	290.90	36.47	238.50	556.50	2.76	7.5	17.26	18	0.6
PIEZ TO 20	38700	45.32	6.60	543.50	226.90	18.43	118.82	556.50	2.84	8.0	17.26	15	5.4